COLLECTION DE TECHNOLOGIE ÉLECTRONIQUE

TUBES ÉLECTRONIQUES A GAZ

PAR

Alexander SCHURE, Ph. D., Ed. D.

TRADUIT PAR

H. ABERDAM

Ancien élève de l'École polytechnique

DUNOD

PARIS

1963

OUVRAGES DU MÊME AUTEUR

dans la même collection

Circuits résonnants.
Étude des circuits à courant continu.
Amplificateurs basse fréquence.
Amplificateurs vidéo.

A paraître :

Étude des circuits à courant alternatif.

COLLECTION DE TECHNOLOGIE ÉLECTRONIQUE

TUBES ÉLECTRONIQUES A GAZ

PAR

Alexander SCHURE, Ph. D., Ed. D.

TRADUIT PAR

H. ABERDAM
Ancien élève de l'École polytechnique

DUNOD
PARIS
1963

Traduction de l'ouvrage publié en langue anglaise
sous le titre

GAS TUBES

par John F. Rider Publisher, Inc., New York

Tous droits réservés.

AVANT-PROPOS

Quand on introduit un gaz ou une vapeur dans un tube électronique, on change considérablement ses caractéristiques par rapport à celle qui existaient quand il y régnait le vide. Ces différences radicales ont été utilisées avec succès par les spécialistes des réalisations électroniques pour construire et mettre au point de nombreux types fondamentaux de tubes à gaz, pour lesquels on a trouvé littéralement des centaines d'applications industrielles.

A titre d'exemple un membre de la famille des tubes à gaz : le tube à électrode de commande connu sous le nom de thyratron est utilisé — pour des applications électroniques — dans presque toutes les industries. Comme la gamme de leurs caractéristiques nominales est très étendue, on peut utiliser les thyratrons dans des circuits échelonnés du contrôle de fortes puissances sous de basses tensions (pour la commande des soudeuses et des moteurs électriques), au tri, au comptage et au classement des marchandises. Le thyratron peut être utilisé comme redresseur (conversion de l'alternatif en continu) et comme onduleur (conversion du continu en alternatif), comme interrupteur ou commutateur pour ouvrir et fermer rapidement des circuits, et comme tube de commande. Comme on s'est contenté, ci-dessus, de décrire les applications d'un seul type de tube à gaz, il est évident que la compréhension de la théorie élémentaire des tubes à gaz présente un grand intérêt.

Le présent ouvrage a été étudié de manière à permettre à l'étudiant de comprendre plus facilement les principes fondamentaux les plus importants de l'électronique. C'est ainsi qu'on a apporté un soin particulier à l'étude de l'ionisation, de la conduction et de la décharge dans les gaz, à l'influence de la

charge spatiale dans les redresseurs à vapeur de mercure ; des tubes régulateurs à gaz, de la théorie et de l'emploi des tubes régulateurs à gaz, etc. Un chapitre entier est consacré aux thyratrons, mentionnant l'essentiel, en partant du comportement d'un thyratron dans un circuit à courant continu pour aboutir aux divers types de circuits à thyratrons. On a aussi décrit d'autres tubes de la cellule photo-électrique à gaz à l'ignitron de grande puissance. Dans tous ces exposés, on donne des notions suffisantes pour permettre à l'ingénieur, au technicien, au réalisateur, à l'amateur et ou l'étudiant s'occupant d'électronique, d'acquérir des connaissances de base complémentaires constituant pour lui un outil extrêmement utile.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1. — **L'ionisation dans les gaz** . . . 1

1. Qu'est-ce que l'ionisation? 1
2. Mouvement des particules ionisées 2
3. La conductivité des gaz ionisés 3
4. Décharge non auto-entretenue 7
5. Décharge luminescente auto-entretenue 9
6. Décharge en arc 11
7. Récapitulation des caractéristiques d'une décharge gazeuse 13
8. Le plasma 14

Questions relatives au présent chapitre 15

CHAPITRE 2. — **Les tubes redresseurs à gaz** 16

9. Les redresseurs à vide poussé 16
10. Phénomènes produits par une « charge spatiale » 19
11. Les deux types de saturation 23
12. Chute de tension aux bornes des redresseurs à vide élevé 23
13. Introduction d'un gaz dans un tube redresseur 24
14. L'effet de la présence d'un gaz dans un tube thermo-ionique 26
15. Caractéristiques électriques des redresseurs à vapeur de mercure 28
16. Filtres de lissage du courant pour les redresseurs à vapeur de mercure 30

Questions relatives au présent chapitre 31

CHAPITRE 3. — **Les tubes à gaz régulateurs de tension** 33

17. Principes des tubes à gaz régulateurs de tension 33
18. Fonctionnement du circuit 35
19. Étude d'un circuit régulateur de tension 37
20. Régulation électronique de la tension 40

Questions relatives au présent chapitre 43

CHAPITRE 4. — **Les thyratrons** 45

21. Structure d'un thyratron triode 45
22. Principe du fonctionnement d'un thyratron dans un circuit à courant continu. 46
23. La courbe de tension critique ou limite de grille 48
24. Commande progressive par la grille d'un déclencheur à thyratron. 50
25. Commande de thyratron par condensateur 52
26. Le thyratron dans un circuit à courant alternatif 54
27. Commande par déphasage d'un thyratron 59
28. Circuits déphaseurs 62
29. Résistance de grille du thyratron et préconduction. . . . 63
30. Thyratrons à grille-écran 65
31. Deux applications directes des thyratrons industriels . . 67
32. Les thyratrons dans les circuits à courant fort 69
33. Circuit retardateur 70

Questions relatives au présent chapitre 74

CHAPITRE 5. — **Autres types de tubes à gaz** 75

34. Cellules photo-électriques à gaz 75
35. Tube à gaz à cathode froide 78
36. Le redresseur à bain de mercure 81
37. L'ignitron 84

Questions relatives au présent chapitre. 87

INDEX ALPHABÉTIQUE 89

CHAPITRE I

L'IONISATION DANS LES GAZ

I. Qu'est-ce que l'ionisation ?

Les atomes et les molécules, constituants normaux de la matière, sont des ensembles électriquement neutres dans lesquels la charge positive totale est égale à la charge négative totale, la charge résultante étant, par conséquent, nulle. Dans la représentation fondamentale d'un atome, la charge positive est portée par le noyau qui comprend des protons et des neutrons, tandis que la charge négative compensatrice totale est portée par les électrons orbitaux.

Les molécules se trouvant dans l'atmosphère sont constamment soumises à des bombardements et à des collisions, lesquels font intervenir des particules animées aussi bien de faibles vitesses que de grandes vitesses, et semblables aux particules alpha émises par les matières radio-actives faisant partie de la croûte terrestre, et aux particules secondaires provenant de la haute atmosphère et engendrées par les rayons cosmiques. Les noyaux de molécules d'azote, d'oxygène, etc., qui composent l'air atmosphérique sont rarement perturbés par des collisions avec des particules animées de mouvements aléatoires, parce qu'ils constituent une cible relativement petite. D'autre part, les électrons orbitaux ont beaucoup plus de chances de subir des chocs directs provoquant leur arrachement de l'atome dont ils font partie.

Quand un atome neutre acquiert ou perd un ou plusieurs électrons, il se transforme en un *ion*. La *perte* d'un électron confère une charge positive à l'atome mutilé, qui devient ainsi un *ion positif*. Il arrive beaucoup moins souvent qu'un atome *gagne* un ou plusieurs électrons de manière à se transformer en *ion*

négatif. Le mot *ion* est par conséquent beaucoup moins précis que les autres noms communs — électron, proton, etc. — donnés aux diverses particules, car il ne définit ni la polarité de la charge, ni la masse de la particule, ni la valeur de la charge qu'elle porte. A cause de la prédominance des ions positifs dans les phénomènes électriques, le terme « ion » désignera dans le présent ouvrage des ions *positifs*, que ce terme soit ou non suivi de l'adjectif « positif » ; quand on voudra préciser qu'il s'agit d'ions négatifs, on ajoutera toujours l'adjectif négatif.

Les rencontres aléatoires entre les ions positifs et les ions négatifs dans l'atmosphère provoquent des recombinaisons progressives qui conduisent à la formation d'atomes neutres. Mais il y a toujours plusieurs centaines de particules chargées par centimètre cube d'air normal.

2. Mouvements des particules ionisées

Du fait qu'un ion est une particule ionisée, il est soumis à une force quand il est placé dans un champ électrostatique

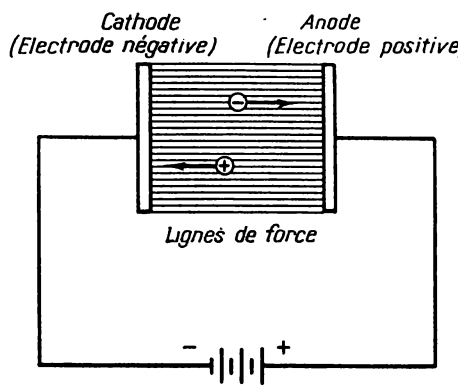

FIG. 1. — Lignes de force et champ électrique entre deux électrodes planes parallèles chargées.

(appelé aussi *électrique*) ou un champ magnétique. La méthode la plus courante permettant de faire agir un champ électrique sur un ion consiste à relier deux électrodes à une source de tension électrique, de manière à créer un *gradient de potentiel*, autrement dit un *champ électrique G* (fig. 1). Les ions positifs

se trouvant dans un champ de ce genre sont accélérés en direction de la *cathode* (électrode négative), tandis que les ions négatifs se déplacent en direction de l'*anode*.

La force exercée sur un ion dans un champ électrique dépend de la charge (en coulombs) et de l'intensité du champ électrique (en volts par centimètre). Exprimée en dynes [1] cette force est donnée par l'équation

$$F = G \cdot e \times 10^7 \tag{1}$$

L'énergie cinétique acquise par une particule chargée qui traverse le champ électrique est égale à la valeur de sa charge e mesurée en coulombs, multipliée par la différence de potentiel V (en volts) entre les deux électrodes. Dans ce cas, l'énergie est donnée en coulombs × volts, autrement dit en joules [2]. On a donc :

$$W = V \cdot e \tag{2}$$

expression dans laquelle W est l'énergie en joules, V la différence de potentiel en volts et e la charge en coulombs.

L'énergie cinétique d'une particule qui se déplace peut être exprimée en fonction de sa masse m (en grammes) et de sa vitesse v (centimètres/seconde), sous la forme :

$$W = \frac{1}{2} \cdot m\, v^2 \tag{3}$$

expression dans laquelle W est en ergs, m en grammes et v en centimètres/seconde.

Comme un joule = 10^7 ergs, l'équation (3) exprimée en joules s'écrit :

$$W \text{ (joules)} = \frac{1}{2} \times 10^{-7}\, mv^2 \tag{4}$$

On déduit des équations (1) et (4)

$$Ve = \frac{1}{2} \times 10^{-7}\, mv^2 \tag{5}$$

ce qui nous donne pour v, vitesse de la particule

$$v \text{ (cm/s)} = 4{,}47 \sqrt{\frac{V \cdot e}{m}} \times 10^3 \tag{6}$$

(1) 1 dyne = 1,019 × 10^{-3} gramme-force à Paris.
(2) 9,81 joules = 1 kilogrammètre à Paris (*N.d.T.*).

Problème 1. — Calculer la vitesse acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de 10 volts. Les valeurs approchées de la charge et de la masse d'un électron sont, respectivement, $1{,}6 \times 10^{-19}$ coulomb et $9{,}1 \times 10^{-28}$ g.

Solution. — Portant ces valeurs dans l'équation 6 :

$$v\ (\text{cm/s}) = 4{,}47 \sqrt{\frac{10 \times 1{,}6 \times 10^{-19}}{9{,}1 \times 10^{-28}}} \times 10^3$$
$$= 4{,}47 \sqrt{10 \times 1{,}76 \times 10^8} \times 10^3$$
$$= 18{,}8 \times 10^7 \text{ cm/s}$$

Puisque 1 km $= 10^5$ cm,

$$v = 1\,880 \text{ km/s } (^1).$$

Problème 2. — Calculer la vitesse acquise par un ion de mercure accéléré par une différence de potentiel de 10 volts (comme dans le problème précédent), la charge positive de cet ion étant numériquement égale à celle d'un électron (l'atome de mercure étant donc simplement ionisé). La masse d'un tel ion de mercure est sensiblement égale à 4×10^5 fois celle de l'électron.

Solution. — Puisque la vitesse varie en raison inverse de la racine carrée de la masse, la vitesse de cet ion sera sensiblement égale à $0{,}0016 \times$ la vitesse de l'électron, soit environ 3 km/s.

Il est souvent plus important de connaître la quantité de mouvement d'un ion en mouvement plutôt que sa vitesse (pour toutes les particules qui se déplacent à une vitesse de beaucoup inférieure à celle de la lumière, la loi de la mécanique classique relative à la conservation des quantités de mouvement est applicable). Ceci signifie que l'objectif très pratique que constitue le calcul de la force nécessaire pour écarter un ion de sa trajectoire est facile à atteindre. Ce problème se pose en télévision, dans la pratique des rayons X, dans l'analyse au spectrographe de masse et dans beaucoup d'autres problèmes concernant la recherche.

La quantité de mouvement est égale au produit de la masse par la vitesse ; autrement dit :

$$\text{Quantité de mouvement} = m \times v \qquad (7)$$

(1) Soit sensiblement 595 km/s pour V = 1 volt (*N. d. T.*).

relation dans laquelle la quantité de mouvement est exprimée en grammes-centimètre par seconde si m est en grammes et v en centimètres/seconde.

Comme la quantité de mouvement est proportionnelle à la masse, l'ion mercure du problème n° 2 a une quantité de mouvement beaucoup plus grande qu'un électron, même si sa vitesse est bien inférieure. Ceci résulte du fait qu'une particule acquiert, dans un champ accélérateur, une vitesse qui est inversement proportionnelle à la *racine carrée* de sa masse, tandis que la quantité de mouvement est *proportionnelle à la masse* elle-même. Par conséquent, le produit mv est, dans un champ donné, d'autant plus grand que la masse des particules est plus grande.

Ce principe a une importance fondamentale du point de vue du fonctionnement du spectrographe de masse et du tube cathodique à image pour télévision. Dans le premier cas, diverses particules mélangées sont séparées par un champ magnétique qui écarte davantage de leur trajectoire initiale les particules les plus légères que les autres, plus lourdes. Dans un tube cathodique pour télévision, on empêche les ions négatifs qui pourraient détériorer la matière phosphorescente de le faire en déviant les électrons en direction de l'écran par un champ magnétique, tandis que les ions négatifs lourds ne sont pas influencés et poursuivent leur chemin qui les éloigne de l'écran phosphorescent.

3. La conductivité des gaz ionisés

Un couple d'électrodes chargées, disposées au sein d'un gaz provoque l'apparition de phénomènes, dus à la conductivité, très différents de ceux observés, dans des circonstances semblables avec des électrodes chargées disposées dans le vide. Si l'on applique une tension à des électrodes au sein d'un gaz et séparées par un petit intervalle (p. ex. de 1 ou 2 cm), cela provoque le passage immédiat d'un courant. L'émission thermoionique ne joue aucun rôle puisque aucune des électrodes n'est portée à une température suffisante pour donner lieu à ce phénomène. Ce faible courant initial est dû à l'ionisation du gaz par des actions extérieures comme les rayons cosmiques et les photons de lumière. Normalement, les ions ainsi formés atteignent une

concentration déterminée, puis commencent à se recombiner pour former des atomes neutres. La vitesse de recombinaison tend à amener un état d'équilibre stable avec la vitesse de formation, de telle sorte que le nombre moyen d'ions libres d'agir en tant que porteurs de charge reste sensiblement constant pour un ensemble de conditions déterminées. Le phénomène de recombinaison est un phénomène aléatoire ; il se produit le plus facilement quand les ions et les électrons tendent, de manière aléatoire, à se rapprocher les uns des autres à de faibles vitesses.

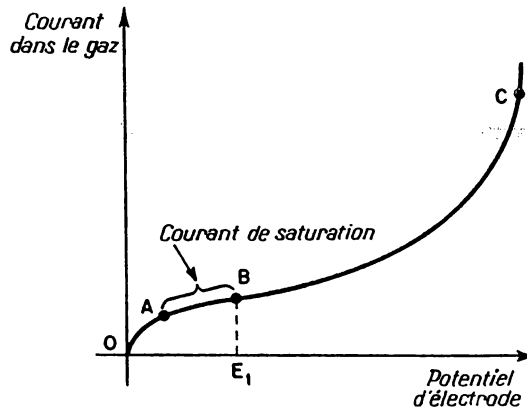

FIG. 2. — Variation de l'intensité du courant dans un gaz en fonction de la tension.

Lorsque le champ électrique entre les électrodes devient plus intense, les ions se déplacent de plus en plus rapidement vers l'électrode dont la charge est de signe contraire (équation 6) et les chances de recombinaison diminuent. Ceci provoque une augmentation du courant dans le gaz jusqu'à ce qu'on atteigne le point pour lequel tous les ions produits par des particules et le rayonnement extérieurs soient entraînés vers l'électrode ayant une charge de signe contraire, la totalité des ions contribuant ainsi au passage d'un courant dans le gaz. Une augmentation du champ électrique au-delà de cette valeur ne provoque plus aucune augmentation du courant dans le gaz. L'intensité du courant dans le gaz est, toutefois, trop faible dans ces condi-

tions pour présenter un intérêt pratique quelconque [1]. Si l'on supprime l'action de la source ionisante en interposant un écran ou par d'autres méthodes, le courant de conduction cesse instantanément. Dans la figure 2, la partie comprise entre O et A représente la variation du courant dans le gaz jusqu'à la saturation ; la partie entre A et B correspond au passage d'un courant de saturation.

4. Décharge non auto-entretenue

Si l'on continue à augmenter la différence de potentiel entre les électrodes au-delà de E_1, le courant recommence à croître. Nous bornant à étudier les électrons arrachés des atomes par les agents ionisants extérieurs, nous pouvons analyser qualitativement les phénomènes qui se produisent alors. Si la différence de potentiel entre les électrodes est suffisamment élevée, un électron peut acquérir une énergie cinétique suffisante, quand il se déplace dans le champ ainsi créé, pour arracher un second électron au premier atome qu'il heurte. On dispose alors de deux électrons pour poursuivre l'ionisation par choc. Puisque le phénomène est cumulatif, il est évident que la voie est ouverte à la circulation de courants très intenses dans le gaz. Bien que l'intensité de ce courant puisse atteindre 20 fois sa valeur initiale (point C de la figure 2), elle dépend toujours de l'afflux initial d'électrons de la source d'ions originelle. Si l'on supprime cette source le courant retombe à zéro en un temps extrêmement court. Pour ce motif, ce type de décharge est connu sous le nom de décharge non auto-entretenue.

Un des meilleurs exemples d'application de la décharge non auto-entretenue est la cellule photoélectrique à remplissage gazeux (ou, plus brièvement, à gaz). Le phénomène est déclenché par des photons de lumière, tombant sur une surface photoémissive, autrement dit une substance émettant des électrons quand elle est frappée par la lumière. Cette surface constitue la cathode du tube et est rendue négative par rapport à une

[1] L'intensité maximum du courant obtenu dans ces conditions correspond au *courant de saturation* et on l'exprime en ampères par mètre carré de section transversale du tube. Elle est de l'ordre de 10^{-22} A/m^2 *.

* Ce chiffre nous paraît un peu faible, la charge d'un électron étant de $1{,}6 \times 10^{-19}$ coulomb — voir aussi la figure 3 ci-après (*N.d.T.*).

autre électrode dans la même enveloppe. Quand les photo-électrons sont attirés par l'anode, ils acquièrent une énergie cinétique suffisante pour ioniser des molécules de gaz sur leurs parcours. Les électrons libérés par l'ionisation contribuent au passage du courant total dans le gaz en servant de porteurs de charges, de telle sorte que l'intensité de ce courant atteint une valeur de 10 à 20 fois celle qu'il atteindrait dans le vide. Quand l'intensité de la lumière augmente, *l'augmentation du courant est beaucoup plus grande qu'elle ne le serait si l'ensemble des phénomènes se produisait dans une atmosphère non ionisante ou dans le vide.* C'est cela qui fait la valeur unique de la cellule photo-électrique à gaz : la présence de gaz augmente l'importance des variations de courant, il se produit une véritable *amplification par le gaz.* Par conséquent, les cellules à gaz sont plus sensibles aux variations du flux lumineux que les modèles correspondants à vide.

Le grand nombre d'électrons arrachés aux atomes ionisés par l'unique électron parti de la cathode porte le nom d'« avalanche d'électrons ». Si a représente le nombre d'électrons (ou d'ions) *nouveaux* formés par un électron parcourant une distance de 1 mètre dans un gaz, et si d est la distance effective entre la cathode et l'anode d'un tube quelconque à décharge dans un gaz, le nombre d'électrons N_e faisant partie d'une avalanche d'électrons déclenchée par un seul électron primaire est par conséquent égal à :

$$N_e = e^{a \cdot d} \tag{8}$$

e étant la base (2,71828...) des logarithmes népériens. Le terme a de cette équation est souvent appelé le *premier coefficient de Townsend*, d'après le nom de l'auteur ayant le premier proposé une théorie acceptable de la « décharge luminescente ». On peut compléter l'équation (8), de manière à exprimer le rapport entre le nombre d'électrons atteignant l'anode et le nombre initial d'électrons quittant la cathode, soit :

$$n_a = n_c \cdot e^{ad} \tag{9}$$

relation dans laquelle n_a est le nombre d'électrons atteignant l'anode, n_c est le nombre d'électrons quittant la cathode, et e^{ad} le nombre exprimant la multiplication due à l'avalanche. Si l'on

multiplie les deux membres de l'équation (9) par la charge de l'électron, on obtient la relation donnant l'intensité des courants dans le gaz :

$$I_a = I_o \cdot e^{ad} \tag{10}$$

dans laquelle I_a est le courant à l'anode et I_o le courant à la cathode. Puisque le courant I_o est, dans le type de tube que nous avons étudié, produit uniquement par une excitation extérieure (la lumière atteignant la cellule photo-électrique), I_a s'annule quand I_o devient lui-même nul lorsque l'excitation disparaît. Ceci explique le caractère non auto-entretenu de la décharge.

5. Décharge luminescente auto-entretenue

Si l'on augmente encore la tension appliquée entre les électrodes du tube à décharge, la courbe représentant l'accroissement du courant devient de plus en plus inclinée, jusqu'à ce qu'il se produise une *décharge disruptive* au sein du gaz du tube, le dit gaz émettant alors de la lumière. La décharge luminescente est en général associée à un courant intense, limité principalement par la résistance extérieure série. Si cette résistance est faible ou nulle, le courant peut atteindre une intensité destructrice. La suppression de la source initiale d'ionisation n'aura aucun effet dans ce cas. La décharge se poursuit en régime *auto-entretenu*, bien que des agents extérieurs aient pu jouer un certain rôle dans son déclenchement.

Pour expliquer la survenance de la décharge disruptive dans le gaz, il faut rechercher un autre mécanisme engendrant des électrons dans le système. On le trouve dans l'émission d'électrons secondaires par la cathode, provoquée par le bombardement de cette électrode par des ions positifs. Si l'on désigne par I_s le courant dû à l'émission secondaire, par I_e le courant provoqué par l'excitation extérieure, et par I_o le courant total à la cathode, on a alors :

$$I_o = I_s + I_e \tag{11}$$

L'intensité totale du courant d'électrons à la cathode est I_o. Ceci signifie que le courant I_i d'ions atteignant la cathode doit

être égal à la différence entre le courant anodique I_a et le courant I_o d'électrons à la cathode. Autrement dit :

$$I_i = I_a - I_o \tag{12}$$

Un ion isolé dans un tube à gaz arrachera, en se basant sur une *moyenne* statistique, n électrons de la cathode. On peut, en utilisant cette grandeur, écrire l'équation 12 sous une autre forme, à savoir :

$$I_s = n\,(I_a - I_o) \tag{13}$$

où I_s est le courant correspondant à l'émission secondaire. En combinant les équations 10, 11 et 13, on obtient l'expression suivante de I_a :

$$I_a = \frac{I_e \cdot e^{ad}}{1 + n - n \cdot e^{ad}} \tag{14}$$

Du point de vue mathématique, le courant anodique I_a tend à augmenter au-delà de toute limite si le dénominateur de la fraction constituant le second membre de l'équation (14) tend vers zéro. Ceci se produira si :

$$n \cdot e^{ad} = 1 + n \tag{15}$$

Puisque un courant infini correspond à une impossibilité physique, ces équations signifient que l'intensité du courant croîtra énormément quand $n\,e^{ad}$ tendra vers $1 + n$. Par conséquent, le passage de la décharge non auto-entretenue à la décharge auto-entretenue se produit quand le premier membre de l'équation (15) tend vers $1 + n$.

Si l'on revient, à titre d'exemple, à la cellule photo-électrique, les caractéristiques attribuées à ces appareils photosensibles par leurs fabricants comprennent toujours une valeur maximum de la tension entre l'anode et la cathode, et cela pour une raison évidente : puisque ces appareils sont destinés à fonctionner en régime de décharge non auto-entretenue, tout dépassement de la tension nominale amène le tube de plus en plus près du régime pour lequel $n \cdot e^{ad}$ est égal à $1 + n$. Quand une décharge auto-entretenue apparaît finalement, le bombardement ionique de la cathode est suffisamment intense pour endommager irrémédiablement, dans la plupart des cas, la surface photo-émissive, rendant ainsi le tube totalement inutilisable.

Le critère d'établissement du régime de décharge auto-entretenue est facile à étudier sur une base qualitative. Bien que les ions ne soient pas, en général, aussi efficaces que les électrons pour la production d'une émission secondaire, si le nombre d'ions et l'énergie cinétique de chacun d'eux sont suffisants, on peut arriver à un régime dans lequel il se passe ceci :

1 électron arraché de la cathode par des sources d'ionisation extérieures donne lieu à une avalanche d'électrons, laquelle, à son tour, engendre un nombre d'ions suffisant pour qu'on puisse compter sur au moins l'un d'entre eux pour arracher un nouvel électron secondaire à la cathode.

Le nouvel électron secondaire prend maintenant la place de l'électron initial libéré par des sources extérieures, la source extérieure devenant alors inutile pour entretenir la décharge. Cet état de choses n'a lieu que quand :

$$n(e^{ad} - 1) = 1 \tag{16}$$

L'équation (16) équivaut, en fait, à l'équation (15). Cette dernière constitue donc le critère définissant l'amorçage d'une décharge luminescente.

6. Décharge en arc

Quand on augmente encore la tension appliquée à un circuit dont fait partie un tube à gaz, on voit apparaître progressivement un phénomène appelé « décharge luminescente anormale » *(abnormal glow)*. Dans ce cas, la densité de courant à l'anode augmente, et il en est de même pour la différence de potentiel aux bornes du tube. Ce qui se passe alors est l'inverse du régime de tensions qui existe pendant la décharge luminescente normale, étudié à la section 5. Bien que l'augmentation de la différence de potentiel aux bornes soit importante dans certaines conditions, elle n'est pas du tout proportionnelle à l'intensité du courant, la relation entre la tension et le courant en régime de décharge luminescente anormale est déterminée par la pression du gaz, la nature de la matière constituant la cathode, etc.

Lorsque la densité du courant augmente encore, on passe brusquement au régime connu sous le nom de « décharge en

arc ». La chute de tension diminue considérablement, tandis que le courant commence à se concentrer sur une petite surface sur la cathode. Une fois ce régime atteint, l'intensité du courant devient fonction de la résistance extérieure et n'est influencée que de manière négligeable par les caractéristiques du tube. En outre, la caractéristique tension-intensité d'un arc présente une *résistance négative* ; autrement dit, la caractéristique tension-intensité, dans laquelle l'intensité est la variable indépendante, présente une pente négative. Ceci est évidemment l'inverse du comportement des éléments d'un circuit normal, dans lequel la chute de tension augmente en même temps que l'intensité du courant.

Les températures élevées des gaz et des électrodes qui succèdent à l'amorçage d'une décharge en arc conduisent à penser qu'un autre mécanisme, en plus du bombardement de la cathode par des ions positifs, est à l'origine de l'afflux additionnel d'électrons lui-même cause de l'accroissement considérable du courant. Pour ce motif, on classe en général les arcs en fonction du mécanisme à l'origine de la libération des électrons supplémentaires.

Un *arc thermoionique* est un arc dans lequel la cathode est portée à une température élevée par la décharge en arc elle-même ou par une source extérieure quelconque d'énergie. L'énergie présente, sous forme de molécules excitées par la température élevée, provoque l'émission d'un grand nombre d'électrons. Les lampes à arc entre électrodes de charbon, et certaines « lampes solaires » au tungstène sont des exemples de décharges thermoioniques auto-entretenues du premier type ; les redresseurs à vapeur de mercure et les thyratrons à remplissage gazeux sont des cas typiques dans lesquels on obtient l'émission thermoionique en chauffant la cathode par l'intermédiaire d'un filament chauffé par une source extérieure.

Un *arc cathodique à faible point d'ébullition* (« low-boiling point cathode arc ») est une décharge dans laquelle un liquide à bas point d'ébullition placé dans un champ électrique très intense émet une grande quantité d'électrons. Les puissants redresseurs industriels à vapeur de mercure et à cuve appartiennent à cette catégorie.

7. Récapitulation des caractéristiques d'une décharge gazeuse

On peut accroître l'intensité du courant traversant un gaz conducteur en augmentant la force électromotrice appliquée ou en diminuant la résistance extérieure. La figure 3 représente dans l'ordre, les changements qui se produisent dans les caractéristiques d'un tube contenant un gaz à mesure que l'intensité

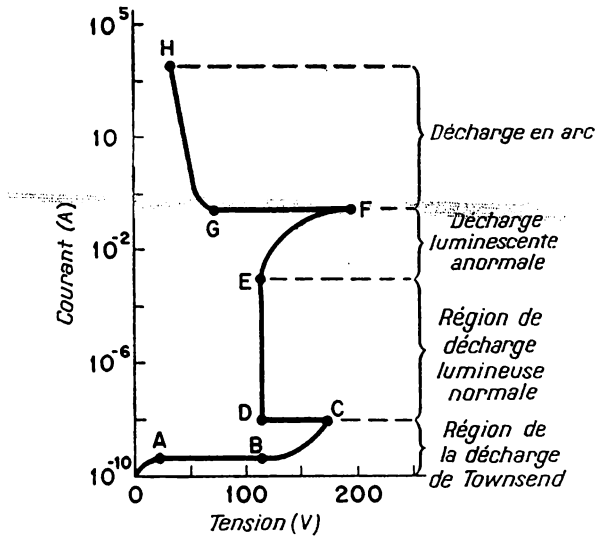

FIG. 3. — Caractéristique tension-intensité d'une décharge dans un gaz, en commençant par la région de la décharge non auto-entretenue de Townsend pour aboutir à la décharge en arc.

du courant augmente (on observera que la figure 3 représente la continuation de la courbe de la figure 2). L'axe des ordonnées (Y, avec échelle logarithmique) met en évidence la gamme très étendue des courants observés. Comme les chutes de tension indiquées en abscisses (axe des X) sont fonction de la nature du gaz utilisé, de sa pression, de la substance constituant la cathode, et de la distance entre les électrodes, la courbe représentative est simplement destinée à indiquer de manière générale les changements qui surviennent. La partie de la caractéristique tension-intensité comprise entre les points A et C a déjà été

étudiée aux sections 3 et 4. Au point C, une avalanche d'électrons permet d'atteindre les conditions correspondant au critère de la décharge auto-entretenue, et une décharge luminescente normale se produit entre D et E. Une nouvelle augmentation de l'intensité du courant amène le point représentatif dans la région de décharge luminescente anormale de la caractéristique, dans laquelle la tension aux bornes du tube augmente en même temps que l'intensité du courant. Le passage aux conditions d'entretien d'un arc a lieu au point F, cependant que la chute de tension diminue brusquement, le point représentatif venant jusqu'en G. De G à H, la caractéristique devient du type à résistance négative mentionné à la section 6.

8. Le plasma

Le plasma est une région au sein d'une décharge dans laquelle le nombre d'ions positifs est sensiblement égal au nombre d'électrons, et ne subit dans l'ensemble aucune variation. Quand un électron libre dont la teneur en énergie provenait du champ électrique appliqué heurte une molécule de gaz, il peut se former des ions. Si ce n'est pas le cas, le choc est *élastique* et dans ce cas l'électron ne communique qu'une faible partie de son énergie cinétique à la molécule, puisque la masse de cette dernière est beaucoup plus grande. Au bout d'un certain nombre de chocs élastiques, l'électron peut, le cas échéant, ioniser une molécule de gaz ; dans ce cas, l'énergie cinétique se répartit entre l'électron originel et l'électron libéré, en deux parties à peu près égales.

Du fait qu'ils ont une masse inférieure, les électrons tendent à sortir du plasma en plus grande quantité que les ions positifs. Beaucoup d'entre eux se déplacent en direction des parois de verre du tube, lui communiquant ainsi une charge négative de quelques volts. Cette tension négative attirera les ions positifs, tandis qu'elle repoussera les autres électrons, formant ainsi une « gaine » ayant une charge positive. Les gaines peuvent être positives ou négatives, suivant la charge initiale du corps autour duquel elles se forment. Les gaines positives se forment autour des corps ayant une charge négative, tandis que, inversement, les gaines négatives se forment autour des corps chargés positivement.

Ces deux termes — *plasma* et *gaine* — apparaissent souvent dans la littérature relative aux tubes à gaz. Bien que ces termes soient susceptibles de définitions quantitatives précises, celles que nous venons de donner suffisent pour le moment.

Questions relatives au présent chapitre

1. Définir les termes suivants : ion ; électron ; proton ; gradient de potentiel ; champ électrique ; équation des forces, exprimées en dynes.
2. Quelle est la vitesse acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 200 volts ?
3. Quelle serait la vitesse acquise par un ion de mercure accéléré par la même différence de potentiel qu'au problème n° 2 ?
4. Indiquer la différence entre la vitesse et la quantité de mouvement quand il s'agit du mouvement de particules des électrons ou ions de mercure, dans un champ d'accélération.
5. On injecte un électron accéléré par une différence de potentiel de 10 volts dans une région où le champ retardateur est de 50 V/cm. Calculer la distance que parcourra l'électron dans cette région, avant d'être renvoyé vers l'arrière.
6. Expliquer le sens de l'expression « décharge non auto-entretenue » et indiquer une application montrant son usage.
7. Expliquer ce qu'est une « décharge luminescente auto-entretenue ».
8. Énumérer les critères qualitatifs permettant l'étude de la décharge auto-entretenue.
9. Pour quelle raison les feuilles de caractéristiques des cellules photoélectriques contiennent-elles toujours une valeur maximum du potentiel anode/cathode.
10. Donner la signification des termes « plasma » et « gaine » dans le cas des tubes à gaz.

CHAPITRE 2

LES TUBES REDRESSEURS

9. Les redresseurs à vide poussé

Il faut, pour étudier les redresseurs à vide poussé, commencer par les principes et les défauts des redresseurs à vide poussé. On pourra ensuite se faire une opinion judicieuse sur les divers types.

Les redresseurs à vide poussé utilisent l'émission thermo-ionique, soit d'une cathode à chauffage direct (filament), soit d'une cathode chauffée indirectement par un élément chauffant enfermé dans un organe autour duquel la cathode, constituée par un manchon de faible épaisseur, est ajustée serrée (voir figures 4 A et 4 B).

Lorsque la cathode a atteint une température suffisamment élevée, sa surface émet alors de grandes quantités d'électrodes. Si l'ampoule vide d'air ne contient pas d'autre électrode, la répartition des électrons à l'intérieur du tube dépend de la vitesse et de la direction initiales des électrons émis. La distribution des électrons à l'intérieur du tube est telle que la plupart sont concentrés autour de la cathode ; certains atteindront la paroi de l'ampoule. Les charges négatives déposées sur cette paroi — ainsi que l'essaim d'électrons qui circule autour de la cathode — exercent une force répulsive sur les nouveaux éléments émis par la cathode. Ces derniers tendent, par conséquent, à revenir vers la cathode, sans avoir d'autres effets mesurables.

Supposons, cela étant, qu'on place un second élément conducteur dans la même enceinte, et qu'on branche une source de tension entre la cathode émettrice et la nouvelle électrode. La polarité de la tension appliquée doit être choisie de manière

à rendre la nouvelle électrode positive par rapport à la cathode ; la nouvelle électrode devient, par conséquent, une anode.

Dans ces conditions, des électrons commencent à se mouvoir, en grand nombre, en direction de l'anode. Du point de vue des charges électrostatiques, on peut dire que ce mouvement est

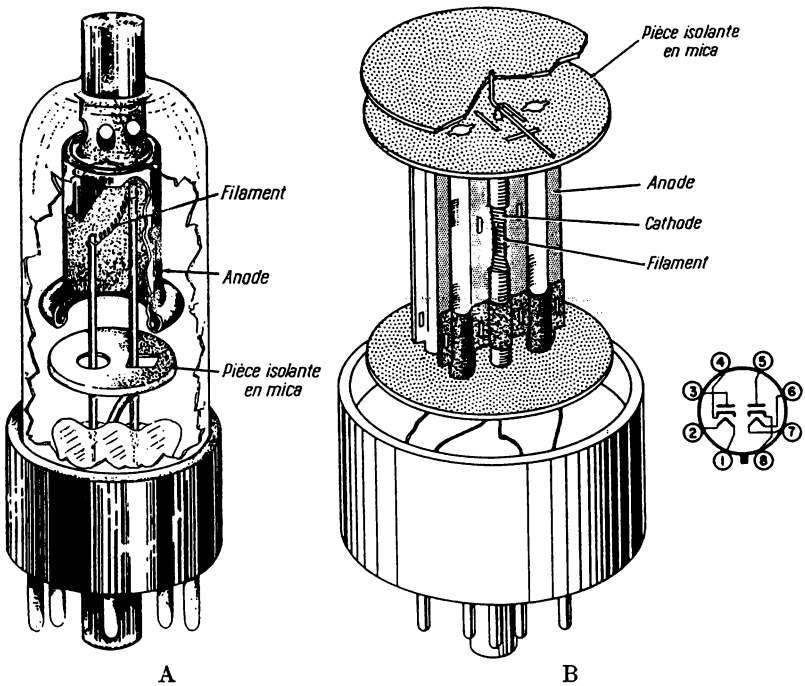

FIG. 4. — Tubes redresseurs à vide demi-onde (pour une seule alternance) : A) à chauffage direct ; B) à chauffage indirect (fabrication R.C.A./U.S.A.).

explicable par l'attraction de charges de noms contraires, les électrons étant négatifs et l'anode positive. Cette manière d'envisager les choses a certainement des avantages ; mais elle est souvent inapplicable dans la pratique. Il est bien préférable de se représenter ce qui se passe dans un tube où règne un vide élevé en partant du *champ électrique* créé entre l'anode et la cathode.

Il existe un champ électrique quasi uniforme entre deux électrodes parallèles planes entre lesquelles on a appliqué une

différence de potentiel. Un champ de ce genre est constitué par des lignes de forces électriques qu'on considère comme partant

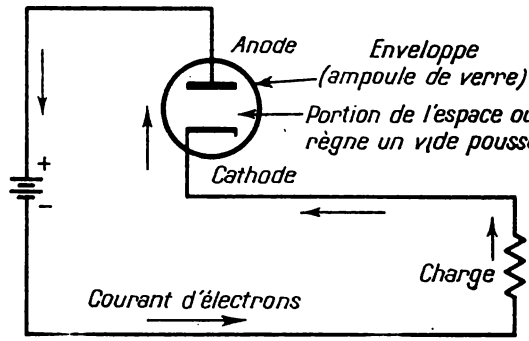

FIG. 5. — Schéma de principe du circuit d'une diode à vide poussé.

d'un point à une tension positive (autrement dit portant une charge positive) sur une surface positive, en faisant un angle

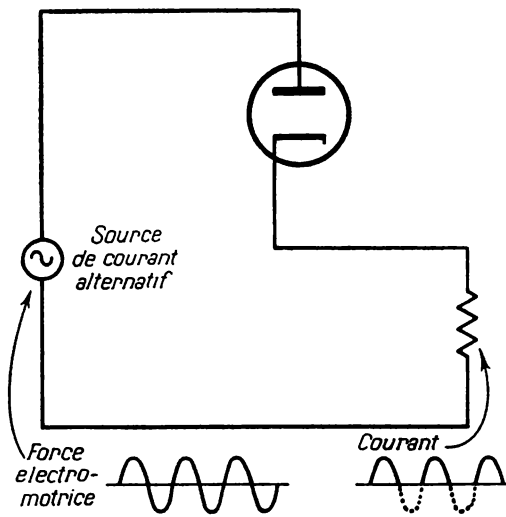

FIG. 6. — Redressement par une diode à vide poussé.

droit avec la dite surface. Chaque ligne de force électrique doit partir, à une extrémité, d'une charge positive et aboutir à l'autre extrémité, à une charge négative de même valeur. Un tel champ

électrique établit un gradient de potentiel (ou de tension) le long duquel peut se déplacer (« en tombant » de la partie la plus négative vers la partie la plus positive) un électron (fig. 1). Bien qu'il soit commode de considérer le mouvement des électrons dans un tube à vide ou à gaz comme une simple question d'attraction électrostatique, l'emploi de la notion de « champ » conduit à des résultats plus fructueux.

Si l'on remplace la source de tension continue de la figure 5 par une source de courant alternatif, il se produit un phénomène de redressement du courant, car les électrons émis par un phénomène thermoionique ne peuvent se déplacer vers l'anode que si le sens du champ est tel qu'il leur permette de « tomber » vers l'anode. Par conséquent, il ne passe, dans le circuit de charge, un courant que pendant les alternances de la tension alternative appliquée où l'anode devient positive par rapport à l'anode (fig. 6).

10. Phénomènes produits par une « charge spatiale »

On va adopter pour le moment une position de principe en ce qui concerne les phénomènes qui se produisent à l'intérieur d'une diode, dans le cas présent un tube thermoionique à vide élevé et à deux éléments. Il y a deux phénomènes séparés et distincts qui nous intéressent :

1° la vitesse avec laquelle chaque électron, ou un électron statistique moyen, arrive sur l'anode et

2° le nombre d'électrons qui arrive, par seconde, sur l'anode qui, en fait, est égal au nombre d'électrons qui passent, à chaque seconde, par un point donné de la charge.

Si l'on établit un champ électrique entre la cathode et l'anode, *son intensité influera uniquement sur la vitesse des électrons qui arrivent sur l'anode.* En régime de fonctionnement limité par la température (autrement dit en régime de saturation), on peut illustrer cela par une analogie. Supposons qu'un homme placé au sommet d'une colline lance une série de billes le long de la pente descendante. S'il lance une bille par seconde, *une bille arrivera à chaque seconde au bas de la colline, quelle que soit l'inclinaison de celle-ci.* Il est évident que le nombre de billes qui arrivent au bas de la colline *ne dépend que de la cadence à*

laquelle l'homme les envoie. De même, le nombre d'électrons qui, à chaque seconde, atteint l'anode est *théoriquement* fonction du taux d'émission par la cathode, et non de l'intensité du champ électrique (ou plus simplement de la différence de potentiel) entre la cathode et l'anode. Comme on peut démontrer que le taux d'émission par la cathode dépend de la température de la cathode, et que le nombre d'électrons qui atteint, à chaque

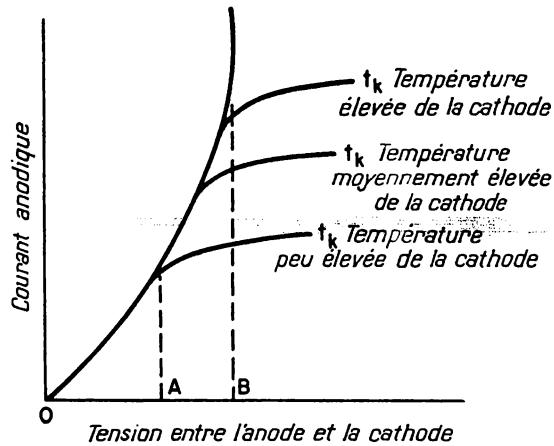

FIG. 7. — Courbes représentant la variation du courant anodique d'une diode en fonction de la tension anodique et de la température de la cathode pour un filament à tungstène thorié.

seconde, l'anode peut être considéré comme un *courant anodique*, on peut en tirer les conclusions fondamentales suivantes :

1° En l'absence d'un autre phénomène, le courant anodique est fonction de la température de la cathode et,

2° le courant anodique est indépendant de la tension cathode-anode. Comme l'expérience ne confirme pas entièrement ces conclusions, on peut en déduire qu'il *existe un autre facteur.* C'est la *charge spatiale.*

Aux tensions anodiques élevées (autrement dit, quand il y a un champ électrique intense entre la cathode et l'anode), le courant anodique dépend dans une large mesure de la différence de potentiel entre ces deux électrodes (fig. 7).

Quand la température t_k de régime de la cathode est relativement basse, la tension anodique n'influe plus — comme c'était le

cas pour des tensions assez basses — sur le courant anodique (point A), Dans le cas particulier représenté, même une faible tension anodique peut extraire les électrons des cathodes à la cadence même où ils sont émis. Quand la température de la cathode s'élève et que le nombre d'électrons émis par sa surface augmente, il faut aussi élever la tension anodique si l'on veut que l'anode continue à attirer tous les électrons disponibles (par exemple le point B de la figure 7). Pourquoi les trois portions rectilignes de la courbe doivent-elles se confondre en une seule

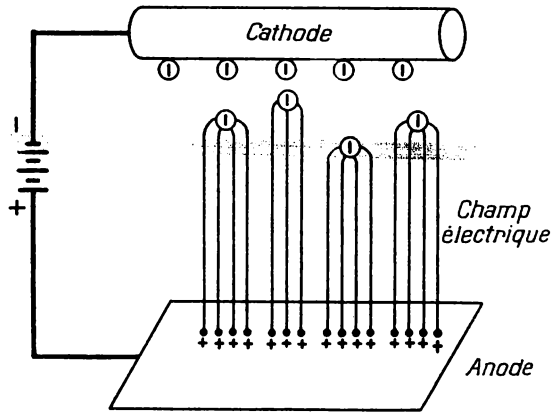

FIG. 8. — La présence d'électrons en mouvement modifie le champ entre l'anode et la cathode.

et même ligne avant d'arriver au point représentatif de la tension d'anode zéro ? Quand la tension est suffisamment basse — au-dessous du point A — il passe un courant qui est indépendant de la température, l'intensité du courant étant déterminée uniquement par la tension anodique. D'autre part quand on augmente suffisamment la tension anodique (point B), elle n'a plus d'influence appréciable sur le courant anodique qui, dans ce cas, ne dépend que de la température de la cathode. Pourquoi cela ?

L'explication est à rechercher dans le phénomène produit par les électrons qui se trouvent à mi-chemin entre la cathode et l'anode. Avant l'apparition de ces particules dans la zone en question, le champ électrique produit par la tension anodique

était constitué par des lignes de force qui partaient de charges positives sur l'anode, pour aboutir à des charges négatives sur la cathode. Ces lignes de forces aboutissent maintenant aux électrons en mouvement eux-mêmes (fig. 8). Le champ électrique uniforme aux lignes de forces rectilignes qui existait précédemment est maintenant considérablement modifié. Le nuage mouvant d'électrons forme maintenant une « masse » négative à laquelle aboutissent les lignes de forces ; on donne à ce nuage le nom de *charge spatiale.* En examinant la figure, on peut voir que le champ électrique entourant la cathode est maintenant presque nul, de telle sorte qu'une grande partie des électrons émis retombent sur la cathode. Par conséquent, la partie du courant anodique émis par la cathode qui atteint effectivement l'anode (courant anodique) diminue sous l'action de la charge spatiale. La charge spatiale agit comme une seconde électrode négative ou *cathode virtuelle*, placée dans le tube au voisinage de la cathode. Chaque fois qu'un électron atteint l'anode, l'extrémité négative de la ligne de force qui aboutit à cet électron disparaît, si bien que cette ligne devient en quelque sorte disponible à nouveau pour aboutir à un autre électron. Ceci permet à un autre électron partant de la cathode de pénétrer dans la région de la charge spatiale, établissant ainsi un régime d'équilibre dont les caractéristiques dépendent de la valeur de la tension anodique appliquée. Ceci rend compte de manière satisfaisante de la partie de la courbe de la figure 7, dans laquelle la température de la cathode (t_k) n'a pas d'action appréciable et dans laquelle la tension anodique commande complètement le courant anodique. On dit souvent que la cathode ne fournit pas directement des électrons à l'anode, autrement dit que la cathode fournit des électrons à la région de la charge spatiale laquelle, agissant comme une cathode virtuelle, émet des électrons qui sont destinés à être absorbés par le circuit anodique. Bien que tout cela semble une jonglerie verbale, on raccorde ainsi correctement la notion de charge spatiale à la notion de champ électrique.

11. Les deux types de saturation

On peut récapituler les notions étudiées au paragraphe précédent de la manière suivante, en faisant une distinction entre deux types de saturation différents, à savoir :

1° *La saturation par la température.* Si la totalité des électrons émis par la cathode à une température donnée sont attirés par l'anode, aucune augmentation ultérieure de la différence de potentiel anode-cathode ne pourra faire varier le courant anodique. On dit qu'on a affaire à une *saturation par la température.*

2° *La saturation par la charge spatiale.* Si la cathode émet plus d'électrons qu'il n'en faudrait pour former le courant anodique, un accroissement de la tension anodique produira une augmentation du courant anodique. Par conséquent, le facteur limitant l'intensité du courant aux tensions anodiques les plus basses est la charge spatiale, et l'on dit que le tube fonctionne en *régime de saturation par la charge spatiale*, à la tension prévue pour satisfaire à cette condition.

12. Chute de tension aux bornes des redresseurs à vide élevé

Considérons le circuit représenté sur la figure 9. Si la charge spatiale n'existait pas, il ne faudrait que très peu de travail pour accélérer les électrons à partir de la cathode en direction de l'anode, du fait de la très faible masse des électrons. Cette quantité de travail presque infinitésimale pourrait être effectuée par une différence de potentiel également infinitésimale entre les deux éléments du tube. C'est ainsi que dans un redresseur parfait, la chute de tension réelle aux bornes du tube devrait être si faible qu'on pourrait la considérer comme négligeable par rapport à une tension appliquée de 100 volts. Dans ce cas la totalité de la force électromotrice E_{bb} de la source apparaîtrait aux bornes de la résistance de charge R, la tension aux bornes du tube étant nulle.

Du fait de l'existence de la charge spatiale cependant, il faudra une différence de potentiel sensiblement plus grande pour que les électrons puissent effectuer leur parcours, à cause de la répulsion qu'exerce le nuage d'électrons constituant la

charge spatiale (voir la section précédente). De plus, quand le courant anodique augmente, le nombre d'électrons dans le nuage augmente également et la tension nécessaire augmente en conséquence. Il est clair que, dans un circuit de diode (fig. 9 B), la tension aux bornes de la diode multipliée par l'intensité du courant passant dans le tube est égale à l'énergie dissipée dans le tube lui-même ; cette dissipation d'énergie se manifeste à son tour sous la forme d'une dissipation de chaleur dans le circuit.

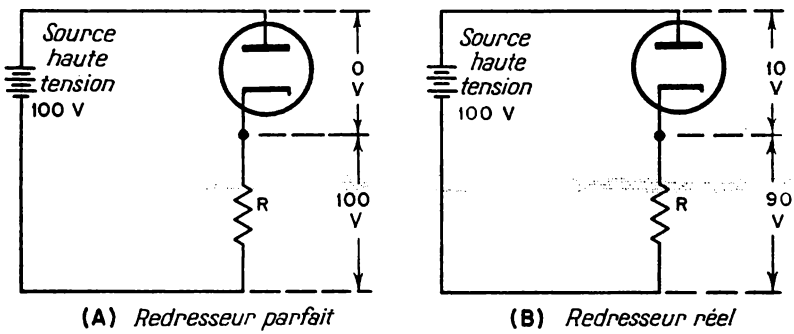

FIG. 9. — Un redresseur parfait (A) laisse passer le courant dans une seule direction sans qu'il apparaisse une différence de potentiel entre l'anode et la cathode ; un redresseur réel (B) présente toujours une différence de potentiel entre ses bornes.

Ceci constitue un des principaux inconvénients des redresseurs à vide élevé ; cet inconvénient a limité leur emploi à des circuits où passe un courant relativement faible comme ceux qui existent dans les récepteurs de télévision et de radio. Les redresseurs à vide élevé ne conviennent pas pour les applications industrielles pour lesquelles on a besoin, pour assurer le fonctionnement de machines, de grande puissance, de courants redressés dont l'intensité atteint des centaines d'ampères.

13. Introduction d'un gaz dans un tube redresseur

Considérons une cathode chaude et une anode dans une ampoule de verre dont on a retiré la plus grande partie de l'air, puis dans laquelle on a fait rentrer ensuite une petite quantité d'un gaz sous une faible tension. Supposons également que la distance entre la cathode et l'anode soit suffisamment grande

pour que le libre parcours moyen de chaque électron soit assez long. (Le libre parcours moyen est la distance moyenne parcourue par un électron entre deux collisions.) Quand la distance parcourue par un électron augmente, la probabilité d'une collision augmente dans des circonstances correspondant à un libre parcours *moyen* donné. Par conséquent, à mesure que la longueur d'un parcours croît, la probabilité d'une ionisation augmente. Si l'on admet que le libre parcours moyen et la tension appliquée sont tous deux suffisants, un grand nombre de molécules gazeuses seront ionisées. Bien que le raisonnement ci-après s'applique également à tous les types d'ionisation, il est préférable, pour simplifier, d'admettre que toutes les molécules de gaz qui sont frappées par des électrons animés d'une grande vitesse subissent une *ionisation simple*, autrement dit qu'un seul électron est arraché à chaque molécule gazeuse après chaque collision. Ceci laisse un ion positif de charge + 1 à proximité d'un électron libéré à l'instant du choc. La présence d'électrons additionnels dans l'espace interélectrodes n'est pas du tout avantageuse, parce qu'ils ne font que s'ajouter à la charge spatiale qui s'y trouve déjà. L'existence d'ions dans ce volume conduit toutefois à une façon différente d'envisager les choses : ils peuvent contribuer à neutraliser la charge spatiale et, en agissant ainsi, à diminuer les pertes d'énergie étudiées à la section 12.

A l'instant où un électron se sépare d'un ion, ces deux particules se trouvent elles-mêmes dans un champ de même intensité. Les deux particules possèdent, en outre, des charges électriques égales (et de signe contraire), et sont, par conséquent, soumises à la même force accélératrice. Le problème n° 2 (section 2) a montré que la vitesse acquise par un ion de mercure dans un champ électrique donné est égale à environ 0,16 % de la vitesse qu'acquerrait un électron dans le même champ. Si le gaz est du mercure, les ions positifs se *déplaceront*, par suite relativement *lentement* en direction de la cathode, cependant que les électrons produits par le même phénomène élémentaire d'ionisation se *précipiteront à toute vitesse* sur la cathode. Ainsi, longtemps après que les électrons nouvellement créés auront atteint l'anode, les ions positifs continueront à se déplacer à travers l'espace inter-électrode. Tenant compte, cela étant, du fait qu'il y a des milliards d'ions de ce genre présents au voisinage de la charge

spatiale à un instant donné, il devient alors évident que leur action d'ensemble peut effectivement neutraliser cette région de l'espace à un point tel que la zone comprise entre les électrodes puisse être considérée comme un *plasma électrique* (section 8).

Ceci modifie radicalement les caractéristiques du tube par rapport à celles d'un tube à vide élevé. Les différences sont récapitulées à la section 14.

14. L'effet de la présence d'un gaz dans un tube thermoionique

Dans une diode à vide, la répartition du champ électrique entre l'anode et la région de la charge spatiale est pratiquement uniforme, le champ étant pratiquement nul au voisinage immédiat de la cathode. Cependant, l'introduction d'un gaz tel que la vapeur de mercure modifie complètement la répartition du potentiel : le champ à la cathode est très élevé, tandis que celui au sein du plasma est pratiquement nul. Toute chute de tension qui se produit dans le tube à gaz se produit au voisinage de la cathode plutôt qu'au sein du plasma.

Puisqu'on a annulé l'effet de la charge spatiale, la chute de tension dans le tube est beaucoup plus faible que celle qui se produit dans un tube à vide. Un facteur encore plus important même que la valeur de la chute de tension est le fait que la chute de *tension aux bornes du tube reste sensiblement constante pour une gamme étendue de courants anodiques.* Dans le cas d'un tube à vapeur de mercure, cette chute de tension est de l'ordre de 10 à 15 volts. Ceci signifie qu'on peut s'attendre à ce que les sources de courant continu comportant des tubes à vapeur de mercure présentent une *régulation de tension* nettement meilleure quand la charge varie, chose très importante en pratique. On peut expliquer de manière très simple cette constance de la chute de tension : une augmentation de l'intensité du courant correspond à un accroissement du nombre d'ions. Par conséquent, alors que la charge spatiale tend à augmenter quand le nombre d'électrons émis par la cathode augmente, elle continue à être neutralisée par le nombre d'ions positifs plus élevé engendrés par des collisions plus fréquentes. Comme on pouvait s'y attendre, les tubes redresseurs à gaz présentent une caractéristique de

résistance négative, la résistance intérieure du tube étant, en gros, inversement proportionnelle à l'intensité du courant passant dans ce tube. Dans ces conditions, la chute de tension anode-cathode ne varie pas (dans certaines limites).

L'intensité maximum du courant que peut fournir un redresseur à tube à gaz est égale au courant de saturation correspondant à l'émission thermoionique de la cathode, *plus* un supplément appréciable dû à la présence d'un champ électrique très intense au voisinage de la dite cathode. Si le tube doit débiter un courant plus intense que celui que peut fournir en toute sécurité la cathode, la chute de tension commence à augmenter. Quand elle dépasse 22 volts environ, la cathode commence à subir un bombardement ionique très intense, et à se désintégrer (ce phénomène est appelé *pulvérisation cathodique*, et la tension pour laquelle il commence à se manifester est connue sous le nom de *tension de désintégration*).

On peut appliquer en même temps les tensions de chauffage et anodique à un redresseur à vide élevé sans risque de le détériorer. Si l'on opérait de la même manière avec un tube redresseur à gaz, on détériorerait sa cathode de manière permanente. On peut expliquer ce phénomène de la manière suivante : pendant les premières secondes qui succèdent à l'application des deux tensions, la température de la cathode est beaucoup trop basse pour qu'elle fournisse des électrons par émission thermoionique. D'autre part, la tension appliquée à l'anode crée un champ assez uniforme dont l'intensité au voisinage de la cathode est sensiblement la même que partout ailleurs dans l'espace cathode-anode. Cet état de choses favorise l'apparition d'une décharge auto-entretenue, accompagnée d'un bombardement intense de la cathode par des ions positifs lourds. Comme les redresseurs à vapeur de mercure comportent des *cathodes à oxydes*, ce sont en général des manchons de nickel recouverts d'oxydes de baryum et de strontium dans la proportion correspondant à une émission abondante d'électrons à basse température — ce bombardement provoquera une désagrégation de la cathode se traduisant par un écaillement de la couche d'oxyde détériorant de manière permanente la cathode.

15. Caractéristiques électriques des redresseurs à vapeur de mercure

Valeurs nominales du courant. — Les caractéristiques des tubes redresseurs à gaz sont définies en fonction du courant *moyen.* C'est le courant maximum que le tube peut supporter sans surchauffe en régime continu, la moyenne devant être calculée sur une période de temps déterminée, de la manière recommandée par le constructeur. Par exemple, un petit tube redresseur à vapeur de mercure tel que le *FG*-190 est prévu pour un courant moyen nominal de 1,25 A en régime continu. Une seconde caractéristique importante est l'*intensité du courant de crête* admissible qui est, par définition, l'intensité maximum du courant qu'on peut laisser passer à travers le tube au cours de chaque période de conduction ; l'intensité du courant de crête est, pour le tube *FG*-190 de 5,0 A. On définit également pour certains tubes la *surintensité maximum* qui est l'intensité du courant maximum pendant une période de temps définie de manière précise. C'est ainsi que la surintensité maximum nominale d'un tube *FG*-190 est de *20 ampères pendant 0,1 seconde.* Il importe de ne pas oublier que si l'on fait fonctionner le tube à la surintensité maximum ou au voisinage de celle-ci — même pendant un temps très court — on diminue sérieusement sa durée d'utilisation.

Tensions nominales. — Pendant la partie du cycle du courant alternatif appliqué où le tube n'est pas conducteur, l'anode est négative par rapport à la cathode, et le tube se comporte comme un tube à décharge non thermoionique. La tension *inverse maximum de crête* est la tension maximum appliquée dans le sens inverse (anode négative) pour laquelle le tube ne risque pas de donner lieu à un arc en retour. La tension inverse maximum de crête nominale d'un redresseur 866-A à vapeur de mercure — un modèle très en vogue pour les faibles puissances — est d'environ 10 000 volts. Voici, d'ailleurs, l'ensemble complet des caractéristiques d'utilisation de ce tube.

Caractéristiques nominales du tube redresseur 866-A à vapeur de mercure.

Courant moyen	0,25 A
Courant de crête	1,0A (par cycle)
Surintensité maximum	(9,0 A pendant 0,1 s)
Tension inverse de crête maximum	10 000 V (environ).

Outre les facteurs qui seraient susceptibles d'influer sur la tension inverse de crête maximum nominale d'un tube à gaz (nature du gaz, pression du gaz, disposition géométrique des électrodes, etc.), il convient de tenir compte de trois autres facteurs importants :

1) La fréquence de la tension appliquée. Aux fréquences élevées, la probabilité de jaillissement d'un arc en retour est accrue, puisque le gaz peut ne pas avoir le temps de se désioniser complètement avant que l'alternance suivante ne survienne.

2) L'intensité du courant circulant dans le tube. Toute augmentation de l'intensité du courant tend à favoriser le jaillissement d'un arc en retour puisque, comme le nombre d'ions formés croît avec l'intensité du courant, il pourra en rester un certain nombre quand la tension inverse sera appliquée au cours de l'alternance suivant celle correspondant au passage du courant.

3) La température du mercure condensé. Il y a toujours une petite cuve contenant du mercure liquide dans un redresseur ; la vapeur provient de cette cuve elle-même. Quand le liquide s'échauffe, la pression du gaz augmente et la tension inverse de crête maximum que le tube peut supporter diminue.

Dans le cas du tube 866 A, par exemple, la tension inverse de crête maximum nominale est d'au moins 10 000 volts quand la température du mercure condensé est inférieure à 50 °C. Si la température du mercure condensé s'élève à 80 °C du fait d'une modification de l'ambiance, la tension inverse de crête maximum s'abaisse à environ 5 500 volts.

16. Filtres de lissage du courant pour les redresseurs à vapeur de mercure

La tension de sortie d'un redresseur est de sens invariable, pulsatoire, et comporte une forte composante alternative. On

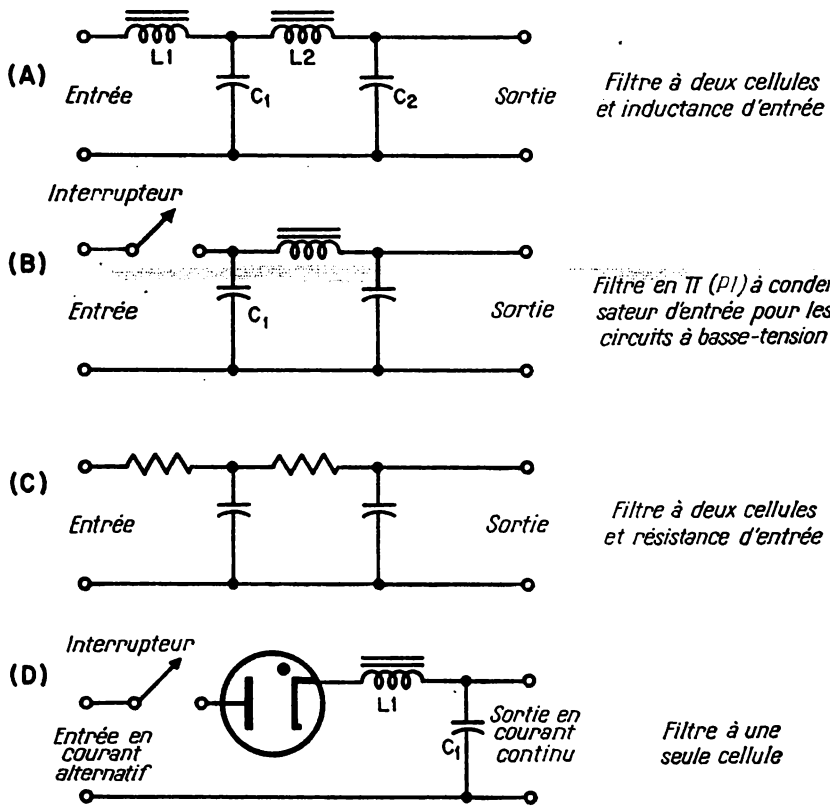

FIG. 10. — Exemples de circuit de filtrage (ou lissage).

utilise très souvent des filtres de lissage constitués par des condensateurs et des inductances à noyau de fer (d'arrêt) pour réduire l'importance de cette composante alternative, bien qu'on utilise parfois des résistances avec des inductances, ou en remplacement de celles-ci. La figure 10 représente plusieurs types de filtres représentatifs.

Le circuit de la figure 10 A est connu sous le nom de *circuit à inductance d'entrée*, et c'est celui qu'on recommande en général pour l'emploi avec des redresseurs à gaz ; C_1 n'est pas chargé avant qu'on mette le circuit sous tension (fig. 10 D). A l'instant où l'on ferme l'interrupteur un courant de charge s'écoule dans C_1 en passant par le redresseur. L'inductance série L_1 limite l'amplitude de cette surintensité à une valeur sans danger pour le redresseur particulier employé, du fait de la valeur élevée de la constante de temps *L-C* de ces éléments.

Dans un filtre simple *à capacité d'entrée* comme celui de la figure 10 B, la seule résistance entre le redresseur et C_1 — à part celle des fils de connexion — est celle du tube redresseur. Par conséquent, lorsqu'on ferme l'interrupteur, la surintensité peut parfois être égale à plusieurs fois l'intensité correspondant à la limite de sécurité du tube. Le circuit de filtrage de la figure 10 C représente un montage dans lequel on a remplacé les inductances par des résistances. Bien qu'on puisse utiliser cet ensemble avec des redresseurs à gaz, il présente divers inconvénients : la puissance dissipée nominale des résistances doit être suffisante pour la charge et la chute de tension aux bornes des résistances faisant partie du filtre peut devenir excessive même pour des charges modérées — annulant ainsi le principal avantage du tube à vapeur de mercure — une faible chute de tension.

Questions relatives au présent chapitre

1. Expliquer le phénomène de redressement dans les tubes à vide poussé.
2. Qu'est-ce qu'une charge spatiale ? Quelle est son influence sur le courant anodique ? Quels sont les autres facteurs qui influent sur le courant anodique ?
3. Énoncer et expliquer les deux types de saturation.
4. Indiquer l'origine de la puissance perdue dans un redresseur à vide poussé, et montrer pourquoi elle constitue un grave inconvénient dans ce type de tube.
5. Expliquer l'origine du phénomène d'ionisation qui se produit quand le tube contient un gaz.
6. Quelle est l'influence du gaz présent dans un tube thermoionique sur l'importance de la chute de tension aux bornes de ce tube. Pourquoi en est-il ainsi ?

7. Qu'est-ce que la « pulvérisation de la cathode » et la « tension de désintégration » ?

8. Si l'on applique en même temps les tensions de chauffage et anodique à un tube redresseur à gaz, on risque de détériorer définitivement la cathode. Pourquoi ?

9. Les caractéristiques types d'un redresseur à vapeur de mercure pourraient être : le courant moyen ; le courant de crête ; la surintensité maximum ; la tension inverse de crête maximum. Quelle est la signification de chacune d'entre elles ?

10. Dessiner un type de filtre utilisable avec des redresseurs à vapeur de mercure.

CHAPITRE 3

LES TUBES A GAZ RÉGULATEURS DE TENSION

17. Principes des tubes à gaz régulateurs de tension

Si l'on se reporte à la figure 3, on voit que la décharge gazeuse dans la région de luminescence normale s'effectue *à tension constante.* La chute de tension engendrée par le gaz conducteur dans la région comprise entre les points D et E ne varie pas sensiblement même si la valeur de l'intensité du courant varie dans une proportion considérable. Par conséquent, tant qu'un tube à cathode froide fonctionne dans les conditions correspondant à une décharge luminescente normale, on observera que la tension aux bornes de ce tube augmente beaucoup plus lentement que l'intensité du courant. On peut tirer profit de cette caractéristique en incorporant un tube à gaz à deux électrodes dans un circuit capable de maintenir constante la tension continue de sortie même si la tension du circuit d'alimentation et la valeur de la charge varient.

La figure 11 représente le schéma de principe d'un circuit régulateur comprenant une diode à cathode froide. Le tube régulateur choisi est du type OC 3 (VR-105/30).

Les caractéristiques de ce tube (fournies par le fabricant) sont indiquées ci-dessous :

1) Tension continue d'alimentation de l'anode (minimum : 133 volts) ;
2) Courant continu de fonctionnement, en régime permanent : 40 mA (max.) ;
3) Intervalle des températures ambiantes : 55 °C à + 90 °C ;
4) Tension d'amorçage en courant continu : 115 V (environ) ;
5) Chute de tension continue entre les bornes (normale) : 118 V;
6) Tolérances de régulation (entre 5 et 40 mA) : la variation de la tension anode-cathode doit être de + ou — 2 volts, la variation maximum de 4 volts.

Pour comprendre le fonctionnement d'un tube régulateur de tension, il convient d'étudier de près le point ci-après :

1) Le tube OC 3 (fig. 12) ne donnera pas lieu à une décharge luminescente normale auto-entretenue tant que la tension entre ses bornes (de *A* à *K*) ne sera pas au moins égale à 115 volts. Ces 115 volts représentent une moyenne, certains tubes pouvant donner lieu à une décharge auto-entretenue pour une tension plus faible. On donne en général à la tension ainsi appliquée le nom de *tension d'amorçage*. Elle est fonction de la distance entre les électrodes, des dimensions des électrodes, de la nature et de la pression du gaz, ainsi que de l'intensité de la lumière ambiante. La tension d'amorçage de la décharge auto-entretenue doit être plus élevée quand le tube est dans l'obscurité que lorsqu'il est en pleine lumière. L'anode de ces tubes est constituée par une mince tige centrale disposée suivant l'axe d'un cylindre qui l'entoure et dont le diamètre est d'environ 7/8″ (22 mm). Le cylindre extérieur sert de cathode. Le montage du circuit doit être tel que la tension initiale aux bornes de l'ensemble de la résistance *R* et du tube régulateur de tension soit de 133 volts au moins, afin de déclencher l'action régulatrice. Cette tension est nécessaire pour assurer la décharge auto-entretenue pendant toute la durée du tube. La valeur moyenne nécessaire pour des tubes neufs est de 115 volts.

2) Les dimensions de l'anode et de la cathode de ce tube régulateur de tension particulier permettent le passage d'un courant d'environ 40 mA sans échauffement excessif ; par conséquent, le tube peut dissiper une puissance maximum de l'ordre de 2 à 4 watts. On conseille en général de ne pas dépasser, en régime normal, un courant de 30 mA.

3) L'intervalle étendu des températures ambiantes d'utilisation indiquées signifie qu'une régulation satisfaisante de la tension ne doit pas être influencée dans une large mesure par la température ambiante.

4) La tension d'amorçage, en courant continu, est la différence de potentiel entre les électrodes nécessaire pour provoquer l'apparition d'une décharge luminescente normale entre l'anode et la cathode.

5) Une fois que la décharge luminescente normale est amorcée, la différence de potentiel entre les bornes du tube s'abaisse à 105 volts environ ; cette tension reste constante dans toute la région de la décharge luminescente normale pour une gamme étendue de courants (de 5 mA à 40 mA).

18. Fonctionnement du circuit

Variation de la tension d'alimentation. — Supposons que la tension d'alimentation de l'ensemble filtre-redresseur tende à augmenter. Dans ces conditions, la tension continue appliquée à l'ensemble régulateur (E_i, fig. 11) augmente, provoquant ainsi une augmentation de l'intensité du courant dans le circuit constitué par la résistance VR et le tube régulateur R. L'augmentation de l'ionisation dans le tube diminue la résistance

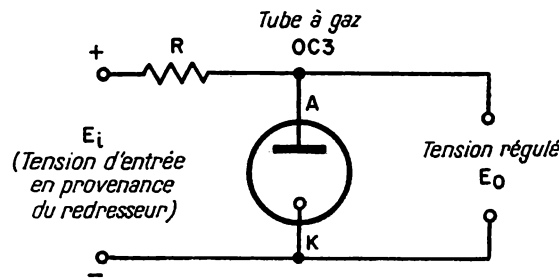

Fig. 11. — Schéma principe d'un régulateur de tension comportant un seul tube à gaz.

interne de ce dernier laquelle, à son tour, maintient la tension aux bornes du tube à une valeur très proche de la valeur initiale. L'augmentation de la tension d'alimentation est absorbée par l'accroissement de la chute de tension le long de la résistance R (résultat de l'augmentation de l'intensité du courant qui la traverse). Une baisse de la tension d'alimentation produit l'effet contraire, la chute de tension le long de la résistance R subit une diminution du même ordre, alors que la tension aux bornes du tube régulateur de tension reste pratiquement invariable. La valeur de la variation possible de la tension d'alimentation est limitée par les valeurs extrêmes — 5 et 40 mA — de l'intensité nominale du courant dans le tube ; si on laisse la tension atteindre

une valeur trop élevée, le tube s'échauffe de manière exagérée et finit par être détruit. Si la tension appliquée est trop faible, la décharge luminescente cesse, de telle sorte que le tube régulateur de tension se comporte alors « vu » de la source de tension et de la charge comme un circuit pratiquement ouvert. Dans ces conditions, il n'y a pas de régulation de tension du tout puisqu'on peut simuler la même situation en supprimant complètement le tube régulateur de tension. Il arrive parfois que l'application d'une tension trop faible provoque également une diminution de l'intensité du courant au-dessous de 5 mA sans arrêter complètement la décharge luminescente. Ceci provoque des variations fantaisistes de la tension de sortie.

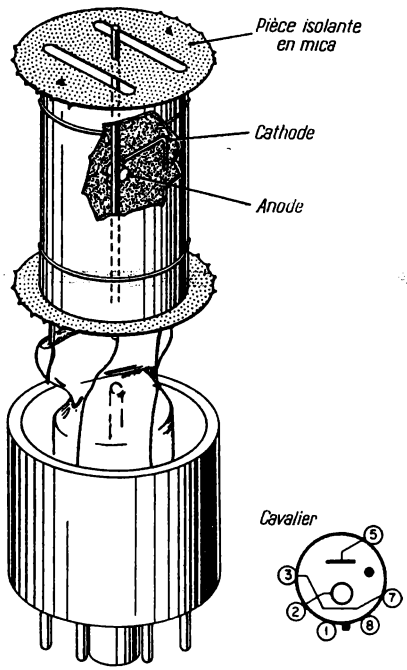

FIG. 12. — Éléments essentiels d'un tube régulateur de tension OC3 (R.C.A.).

Variations de la charge. — Considérons une charge dont la résistance est telle qu'elle permette le passage d'un courant de 20 mA à travers le tube régulateur de tension. Si, cela étant, la résistance de la charge diminuait, un courant plus intense circulerait à travers R, augmentant la chute de tension aux bornes de cette résistance. En l'absence de tube régulateur de tension dans le circuit, il en résulterait une diminution proportionnelle de la tension aux bornes de la résistance de charge, autrement dit une régulation médiocre. Dans ce cas, cependant, l'augmentation de la chute de tension le long de la résistance diminue la tension aux bornes du tube régulateur de tension, réduisant ainsi l'intensité du courant dans ce tube. La diminution résultante de l'ionisation augmente la résistance du tube, de

telle sorte que la chute de tension aux bornes de ce dernier reste constante (105 volts dans ce cas). Ainsi la charge est toujours connectée aux bornes d'une source de tension de 105 volts et la régulation est améliorée.

19. Étude d'un circuit régulateur de tension

On se rendra mieux compte du fonctionnement d'un tube régulateur de tension en étudiant un exemple démonstratif de réalisation d'un circuit avec régulation de la tension comme celui représenté sur la figure 13.

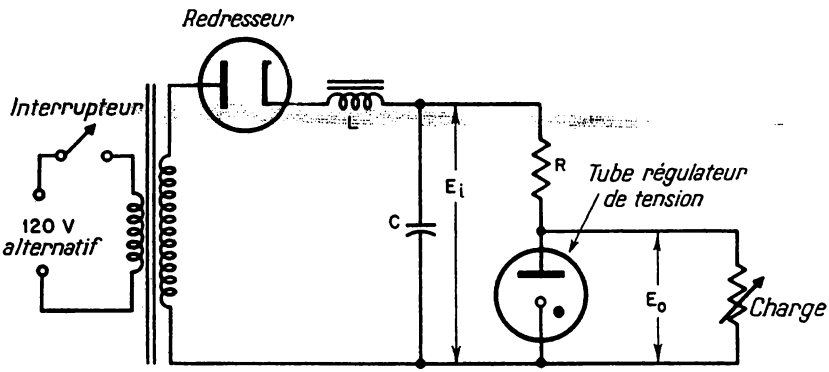

FIG. 13. — Réalisation pratique d'un circuit à tube régulateur de tension.

Prenons comme point de départ les chiffres suivants :

Variations de la tension d'alimentation (E_i) : 250 V à 300 V.

Variations de l'intensité du courant dans la charge (I_L) : 10 mA à 30 mA.

Caractéristiques du tube régulateur de tension :

E_o = 150 volts régulés.
I_{vr} = 5 mA (min) à 30 mA (max.)
E_{min} = 165 V (tension d'amorçage).

Le problème consiste à déterminer la valeur optimum de la résistance série R.

Première phase. — Déterminer la valeur de R quand la tension d'entrée E_i est la plus élevée et le courant dans la charge (I_i)

est minimum. C'est alors que le tube régulateur de tension sera parcouru par le courant maximum admissible. Le courant circulant dans la résistance R est égal à la somme de I_{vr} et de I_t, autrement dit à 30 mA + 10 mA = 40 mA. Au même instant, la tension d'entrée E_t est de 300 V, cependant que la chute de tension le long du tube régulateur de tension doit être de 150 V. Par conséquent, la chute de tension aux bornes de

$$R = 300 - 150 = 150 \text{ V}.$$

On déduit de ces valeurs : $R = 150/0{,}04 = 3\,750$ ohms.

Deuxième phase. — Procéder à une vérification pour être certain que l'intensité du courant dans le tube régulateur de tension n'est pas inférieure à 5 mA quand E_t est minimum (250 volts) et que le courant I_t dans la charge est maximum (20 mA). Si E_t est égal à 250 volts, la chute de tension aux bornes de R est de 250 — 150 = 100 volts. Par conséquent, le courant total circulant à travers le tube régulateur de tension et la charge est de $100/3\,750 = 0{,}027$ A = 27 mA. Étant donné que l'intensité du courant dans la charge est de 20 mA, il reste 27 — 20 = 7 mA pour le tube. Ceci dépasse la valeur minimale de 5 mA et est, par conséquent, admissible.

Troisième phase. — Procéder à une vérification pour déterminer si le tension d'amorçage est obtenue même dans les conditions les plus défavorables, à savoir : la tension d'alimentation E_t est minimum (250 V) et l'intensité du courant dans la charge est maximum (20 mA). Pour une tension d'alimentation égale à 250 V, la tension aux bornes de la résistance (lorsque le tube régulateur de tension ne laisse passer aucun courant) est

$$E_r = 0{,}02 \times 3\,750 = 75 \text{ volts}.$$

Il reste par conséquent

$$250 - 75 = 175 \text{ volts}$$

pour la tension appliquée aux bornes du tube régulateur de tension, pour provoquer son amorçage. Puisque cette tension est supérieure à la tension d'amorçage nominale de 165 volts, on ne doit se heurter à aucune difficulté quand on met le circuit sous tension.

Les tubes régulateurs de tension existant dans le commerce sont utilisés isolément pour permettre d'obtenir des tensions de sortie de 75 ; 90 ; 105 et 150 volts (tubes OA3, OB3, OC3 et OD3, respectivement). Quand on a besoin de tensions régulées supérieures à ces valeurs, on peut monter en série de manière quelconque deux ou trois tubes du commerce, puisque tous ceux énumérés ci-dessus admettent la même intensité de courant

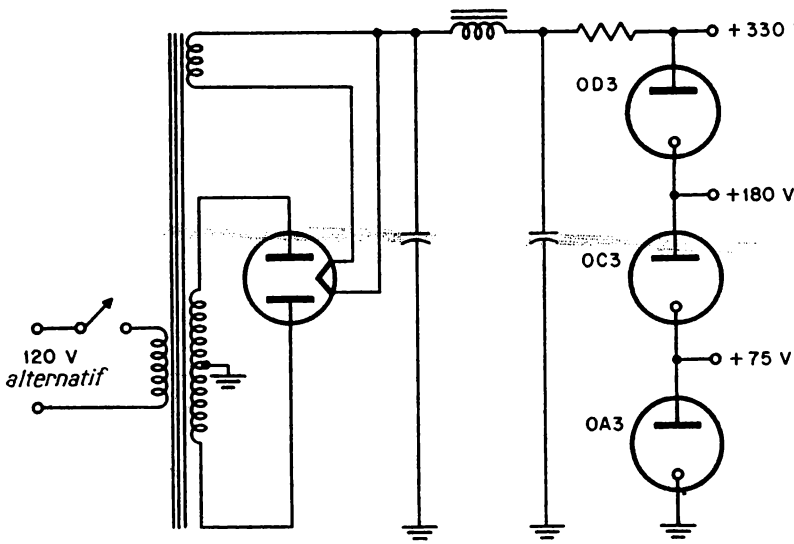

FIG. 14. — Réalisation pratique d'un bloc d'alimentation fournissant trois tensions régulées.

nominale. D'autres tubes utilisés couramment sont les tubes miniatures à 7 broches types OA2 et OB2. Ils ont des tensions nominales de sortie de, respectivement, 150 volts et 105 volts. La figure 14 représente un bloc d'alimentation complet avec redressement à onde entière fournissant trois tensions régulées, à savoir : 330 volts ; 180 volts et 75 volts. On peut utiliser un bloc d'alimentation de ce genre dans un système de sonorisation extérieure (amplificateur à fréquence acoustique) de haute qualité dans lequel on utilise la prise à 330 V pour alimenter les anodes des tubes de sortie basse fréquence, la prise 180 V pour fournir la tension écran de ces tubes et la tension anodique des amplificateurs de tension qui précèdent l'étage de sortie,

tandis que la prise 75 V est destinée à l'alimentation de l'étage (ou des étages) pré-amplificateur (s) à gain élevé.

20. Régulation électronique de la tension

Il est nécessaire, dans de nombreuses réalisations d'équipement électronique, de prévoir des blocs d'alimentation dans lesquels la tension de sortie doit être régulée avec une grande précision. Une condition supplémentaire qu'on impose également est la possibilité de régler à volonté (entre certaines limites) la tension fournie par le bloc d'alimentation.

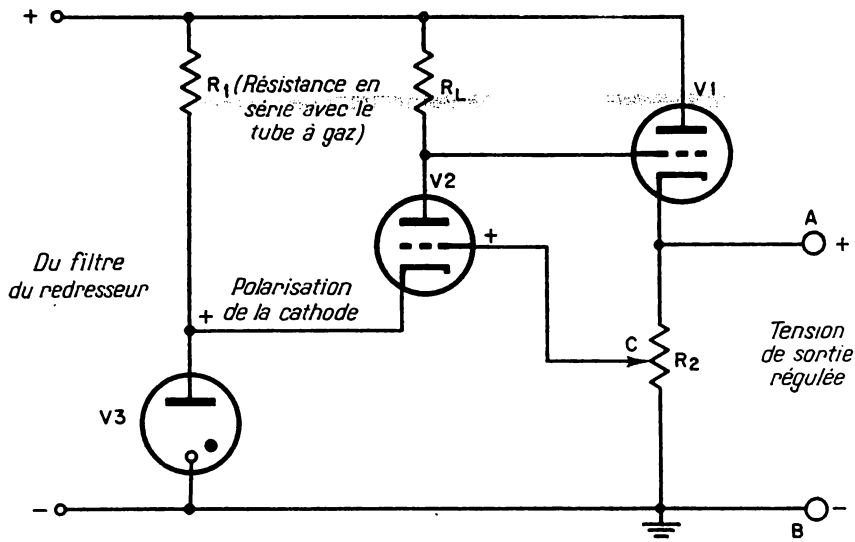

FIG. 15. — Circuit régulateur de tension électronique.

La figure 15 représente un circuit dans lequel l'amplification donnée par un tube à vide triode (V_2) (employée en liaison avec un tube régulateur à gaz servant de référence de tension) est utilisée pour agir sur la tension grille d'un tube de commande. On monte la triode (V_2) de manière qu'elle se comporte comme un amplificateur en classe A, tandis qu'une seconde triode (V_1) fera fonction de résistance variable. Le tube V_1 est intercalé, dans ce montage en série avec la connexion de sortie du bloc d'alimentation proprement dit. L'étage amplificateur classe A est monté de

telle manière qu'une fraction réglable de sa tension de sortie est appliquée à sa grille [1] de telle sorte que toutes les fluctuations de tension qui se manifestent dans le circuit de sortie à courant continu provoquent, par l'intermédiaire de cet étage amplificateur, des variations de la tension grille du tube de commande V_2 monté en série. On comprendra mieux le fonctionnement de l'ensemble en étudiant successivement l'effet d'une variation de tension, l'application de la contre-réaction et la correction de la dite variation de tension.

Supposons que la tension de sortie entre les bornes A et B augmente à cause d'une variation de la tension du secteur, d'une variation de la charge, ou même de la tension d'ondulation résiduelle qui n'a pas été éliminée par le circuit de filtrage. Le point C devient, dans ces conditions, *plus positif* par rapport à la masse. Le courant anodique de V_2 doit augmenter du fait de l'application d'une tension de polarisation positive. L'augmentation de la chute de tension le long de R_L abaisse la tension anodique de V_2, et, par conséquent, la tension de grille *positive* V_1 par rapport à la masse. Comme la grille de V_1 est, cela étant, moins positive qu'elle ne l'était antérieurement, la résistance interne de V_1 augmente, diminuant ainsi légèrement la tension entre les bornes de sortie A et B. On notera que la phase de la contre-réaction a été choisie de telle manière que la variation initiale de tension a été contrecarrée par la variation de la chute de tension aux bornes du tube V_1.

On n'a pas encore mentionné un élément très important du montage : le tube V_3 régulateur de tension. Si V_2 doit fonctionner en classe A avec une tension positive élevée appliquée à sa grille (en partant du point C), la cathode du tube doit être encore plus positive, de telle manière que la grille soit négative par rapport à la cathode. En outre, le potentiel de la cathode doit être maintenu à un niveau constant — tout au moins à quelques centièmes près — si l'on veut que les fluctuations du courant anodique de V_2 provoquées par des variations de la tension de sortie n'aient aucune influence sur le potentiel de la cathode. Si cela devait se produire, le point de fonctionnement de V_2 devrait se déplacer pour chaque petite variation de la tension de la cathode, et V_2 perdrait de son efficacité en tant qu'élément

[1] Il est donc pourvu d'une contre-réaction (*N. d. T.*).

régulateur. On donne, pour ce motif, le nom de *potentiel de référence* à la différence de potentiel aux bornes de V_3 ; c'est le seul potentiel dans le circuit qui ne doit pas varier quand la tension du secteur ou la charge varient.

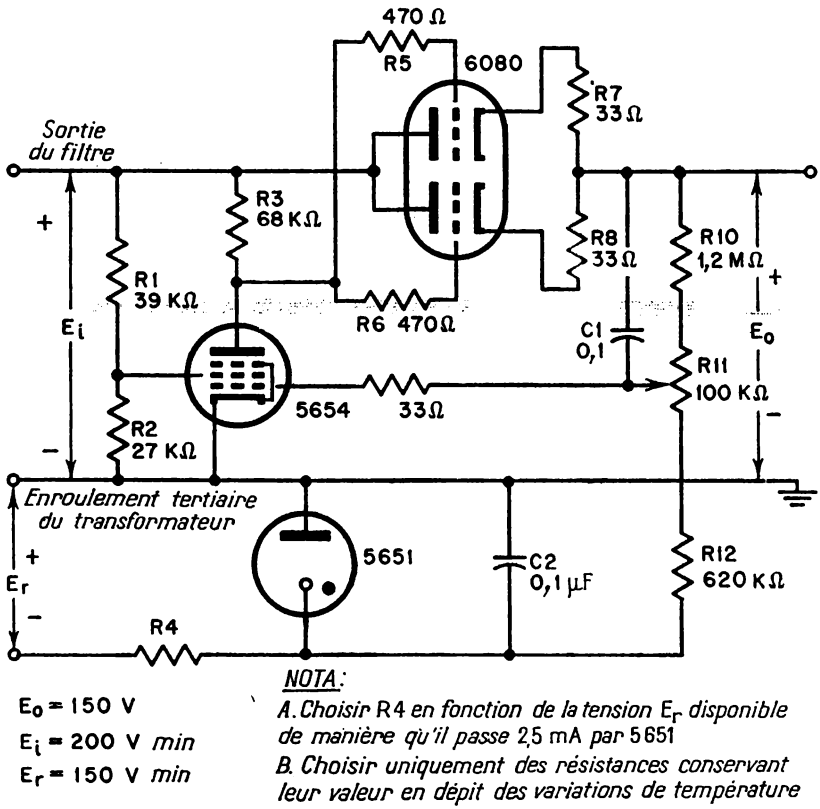

FIG. 16. — Réalisation pratique d'un bloc d'alimentation régulé.

Le réglage du potentiomètre R_2 détermine la tension continue de sortie résultante du système régulateur. Quand on déplace davantage le curseur vers le bas (vers la masse commune), la tension de la grille de V_2 devient plus négative par rapport à sa tension « constante » de cathode, et son courant anodique diminue, provoquant un accroissement dans le sens positif de la tension appliquée à la grille de V_1. La diminution consécutive

de la résistance anodique de V_1 provoque une augmentation de la tension apparaissant entre A et B. De même, lorsqu'on déplace le curseur vers le haut, de manière à accroître sa tension positive par rapport à la masse, la chute de tension le long de R_L augmente, et rend la grille de V_1 plus négative. Cela entraîne un accroissement de la résistance série et la tension de sortie diminue.

Un ensemble régulateur de tension semblable à celui qui vient d'être décrit réduit en outre la tension d'ondulation à la sortie dans la proportion même où il réduit les variations de la tension du secteur. Les variations de la tension en provenance du filtre du redresseur et appliquées à l'entrée du régulateur sont traitées par ce dernier de la même manière qu'une variation de la tension du secteur. Les valeurs des éléments R_1, R_l, R_2, etc., ont été indiquées en se basant sur les conditions correspondant aux tubes et aux tensions utilisés dans ce cas particulier. On emploie en général, dans la pratique, une pentode comme tube V_2, afin de profiter de sa pente élevée, ceci oblige à prévoir quelques petits éléments supplémentaires pour régler correctement les valeurs relatives des tensions anodique et d'écran. La figure 16 représente une réalisation pratique de bloc d'alimentation à tension régulée comportant des tubes à vides modernes.

Questions relatives au présent chapitre

1. Quelle est la tension d'amorçage du tube OC3 ?
2. Quel est l'intervalle maximum des courants admissibles pour un tube régulateur de tension OC3 ?
3. Consulter un manuel des caractéristiques de tubes électroniques pour déterminer les gammes types d'intensités de courant admissibles : 1° pour un certain nombre de tubes régulateurs de tension à culot octal ; 2° pour des tubes miniature ; 3° pour le tube 5651.
4. Quelle est l'intensité maximum recommandée du courant à faire passer par un tube VROD3 ?
5. Un bloc d'alimentation fournit une tension comprise entre 350 et 400 volts. Une charge connectée aux bornes de ce bloc doit consommer 30 mA sous 150 volts. On utilise une résistance chutrice série et un tube VR 150 pour alimenter la dite charge. On demande :

a) La valeur de la résistance série à employer pour que le courant à travers le tube régulateur de tension ne dépasse pas 30 mA ;

b) L'intensité minimum du courant passant par le tube régulateur de tension.

6. On a besoin d'une tension régulée de 225 volts aux bornes d'une charge. En se basant sur un manuel de caractéristiques, déterminer le type de tube à employer et son montage.

7. Quel est le mode de fonctionnement du tube V_1 dans le circuit de la figure 15 ?

8. A quoi sert le tube régulateur de tension (V_3) dans le circuit de de figure 15 ?

9. Comment peut-on se rendre compte si un tube régulateur de tension est opérant ?

CHAPITRE 4

LES THYRATRONS

21. Structure d'un thyratron triode

Quand on introduit une grille de commande dans une diode thermoionique à gaz, les propriétés de la triode ainsi réalisée

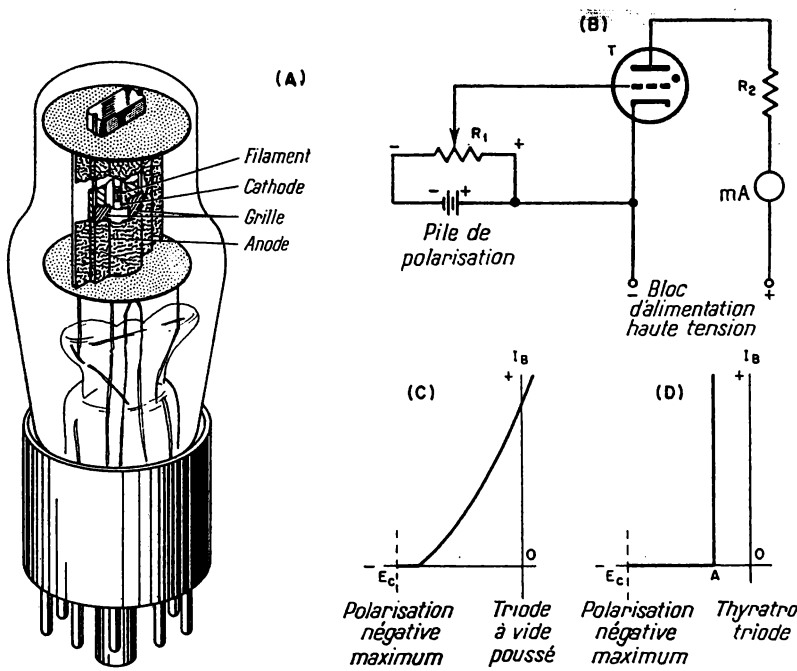

FIG. 17. — Thyratron triode 884 (fabrication R.C.A./U.S.A.). (A) Vue en coupe. (B) Circuit représentant le fonctionnement du thyratron. (C) Caractéristique « tension anodique-courant grille » d'une triode à vide poussé. (D) Caractéristique « tension anodique-courant grille » d'un thyratron.

sont totalement différentes de celles d'une triode à vide. Les tubes à gaz contenant une cathode chaude, une ou deux *grilles* et une anode sont connus sous le nom de *thyratrons* ; de nombreux thyratrons modernes de faible puissance sont munis d'une *grille écran* intercalée dans le but de réduire l'intensité du courant grille de la grille de commande ; ces tubes seront étudiés plus loin. La figure 17 A représente la structure d'un thyratron triode type.

La grille est constituée en général par un cylindre creux qui entoure à la fois l'anode et la cathode, avec un écran séparateur percé de petits trous disposé entre ces deux éléments. Cet écran sépare presque complètement l'anode de la cathode, de telle sorte qu'une faible tension appliquée à la grille peut neutraliser presque complètement la tension d'anode élevée, empêchant ainsi l'amorçage d'un arc sous des tensions où il devrait normalement se produire.

22. Principes du fonctionnement d'un thyratron dans un circuit à courant continu

On se rend compte des différences entre un thyratron et une triode à vide poussé en examinant la figure 17. Si le tube *T* était une triode à vide, un déplacement du curseur du pôle *moins* vers le pôle *plus* de la source de polarisation provoquerait une variation assez régulière du courant anodique, indiquée par un milliampère intercalé dans le circuit anodique. De même, un déplacement du curseur dans le sens opposé aurait l'effet contraire : une diminution progressive du courant anodique.

Quand on remplace le tube à vide par un thyratron, on observe a série de phénomènes suivants :

a) Si le curseur est au contact immédiat du pôle *moins*, le milliampèremètre du circuit anodique indique zéro.

b) Quand on déplace ce curseur en direction du pôle positif de la batterie, le courant anodique reste nul tant que la tension grille n'a pas atteint une valeur critique déterminée.

c) Quand la tension de grille critique est atteinte, le courant anodique *augmente* brusquement jusqu'à atteindre son intensité

maximum, dont la valeur est imposée par la tension aux bornes de la source haute tension et la valeur de R_2.

d) Tout nouveau déplacement du curseur de R_1 n'a absolument aucun effet sur le courant anodique indiqué par le milliampèremètre.

e) Quand on ramène le curseur de R_1 vers le pôle négatif, le courant anodique continue à passer en conservant sa valeur maximum, même si l'on ramène le curseur au voisinage immédiat du pôle négatif. La tension de la grille n'influe plus sur l'indication du milliampèremètre.

Il importe d'observer, à ce sujet, qu'il ne faut jamais *utiliser un thyratron en l'absence de charge anodique.* Bien que cela soit admissible dans un circuit à tube à vide — par exemple dans un circuit servant à déterminer les caractéristiques d'un tel tube — il est presque certain que l'absence de charge anodique endommagera le thyratron de manière irréparable si on lui fait subir la suite d'opérations indiquée ci-dessus. A l'instant où la décharge dans le thyratron s'amorce (point *A* de la figure 17 D), la résistance du tube s'abaisse jusqu'à un chiffre très bas. En l'absence de résistance série limiteuse, le courant anodique est excessif et l'ionisation intense résultant, du bombardement ionique, détériorera gravement la cathode.

Une fois que l'arc a jailli, la grille n'exerce plus aucun contrôle sur le courant anodique. Après le jaillissement de l'arc, la grille est plongée dans un plasma et est séparée de lui par une gaine d'ions positifs, si bien qu'une variation de la tension grille ne peut que modifier l'épaisseur de cette gaine, et non la répartition du potentiel. Le moyen le plus simple d'éteindre l'arc dans ces conditions consiste à couper la tension anodique, ou tout au moins à l'abaisser à un niveau inférieur à celui nécessaire pour entretenir l'arc. Quand un thyratron commence brusquement à conduire le courant, on dit qu'il *s'amorce.* Le terme *extinction* est relatif au passage de l'état amorcé à l'état dans lequel la désionisation est complète.

23. La courbe de tension critique ou courbe limite de grille

La tension de polarisation pour laquelle un thyratron donné s'allume varie en même temps que la tension appliquée à l'anode. D'un point de vue qualitatif [1], il est évident qu'une augmentation de la tension anodique tend à provoquer l'amorçage du

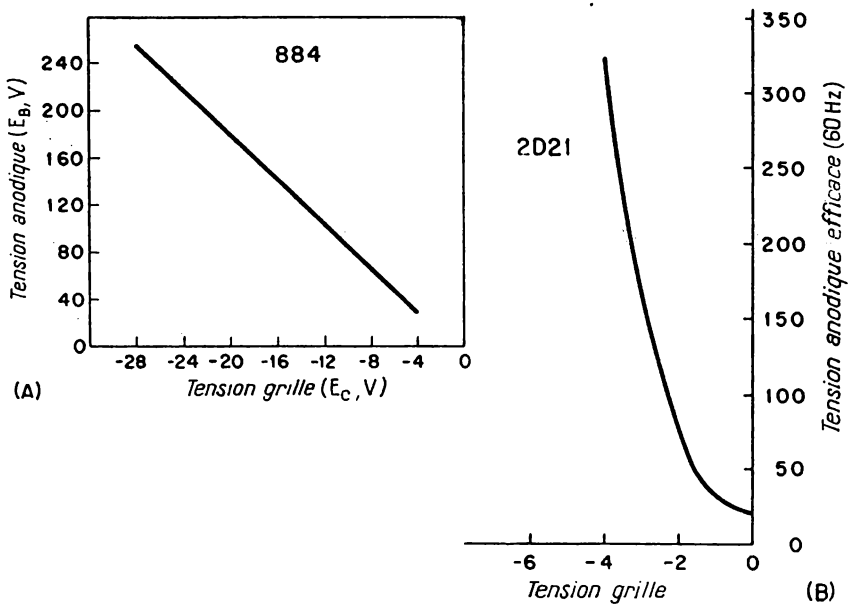

FIG. 18. — Courbe de tension limite (critique) de grille pour un thyratron triode à gaz (rempli d'argon type 884 (fabrication R.C.A./U.S.A.) ; (B) Caractéristique « moyenne » de tension limite (critique) de grille en fonction de la tension anodique pour un tube 2 D 21 avec une résistance grille de 2 mégohms.

tube même si la grille est portée à une tension négative appréciable. Lorsqu'on diminue la tension appliquée à l'anode, la tension négative à appliquer à la grille pour empêcher l'amorçage diminue également. La valeur de la résistance série de protection (limiteuse), marquée R_2 sur la figure 17 B n'a aucune influence sur le potentiel d'amorçage puisque, avant que l'arc ne s'amorce,

[1] Certains thyratrons exigent une tension de grille *positive* pour s'amorcer.

aucun courant ne passe dans cette résistance et, par conséquent, aucune chute de tension n'apparaît à ses bornes. Par conséquent, le potentiel de l'anode avant l'amorçage est égal à la tension de la source.

On peut tracer les caractéristiques complètes d'allumage d'un thyratron sous la forme d'une courbe appelée *courbe de tension*

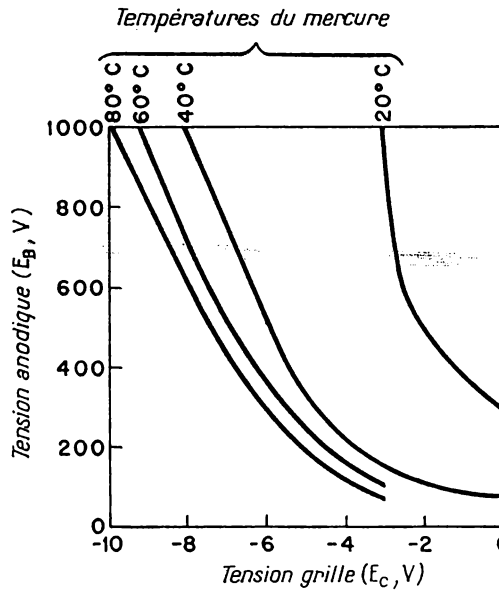

FIG. 19. — Courbes de tension critique de grille (caractéristiques de commande), du thyratron à vapeur de mercure FG-27 A.

critique (ou limite) *de grille* (fig. 18 A). Le tube, dont la caractéristique est représentée par cette courbe, est rempli d'argon et contient un nombre invariable de molécules de gaz ; sa courbe de tension limite de grille est très voisine d'une droite entre ses limites nominales d'utilisation. Pour déterminer, par exemple, la tension anodique d'amorçage nécessaire pour une tension grille de — 20 volts, il suffit de chercher le point d'intersection entre la droite d'ordonnée — 20 volts et la courbe, et de lire la tension anodique correspondante, à savoir 142 volts. On utilise les courbes de manière semblable pour déterminer la tension

grille nécessaire pour empêcher l'allumage du thyratron à une tension d'anode donnée.

On observe souvent une courbure plus prononcée que celle qui apparaît sur la courbe de la figure 18 A. Les courbes du thyratron 2D21 (fig. 18 B) ont une allure plus typique. La courbe de tension limite de grille est fonction de la valeur de la résistance en série avec la grille.

Les thyratrons à vapeur de mercure qui sont de loin les plus employés dans les applications industrielles des courants forts présentent toute une famille de caractéristiques de tension limite de grille puisque la température du mercure condensé constitue maintenant un troisième paramètre. La figure 19 représente un réseau typique de courbes pour un thyratron à vapeur de mercure. Ces courbes indiquent nettement que plus la température du mercure condensé est basse, moins la tension négative de grille nécessaire pour empêcher l'amorçage est grande en valeur absolue. A mesure que la température du mercure s'élève, la pression du gaz augmente ; il en résulte une situation dans laquelle le tube s'amorce plus facilement pour des tensions de grille données, et la tension de grille doit par conséquent être plus négative pour empêcher l'amorçage d'un arc.

24. Commande progressive par la grille d'un déclencheur à thyratron

La conductibilité considérable d'un thyratron amorcé suggère tout de suite l'emploi de ce tube comme interrupteur dans un circuit à courant continu. Lorsque le point de fonctionnement est bien choisi, le courant grille est très faible, régime qui ne nécessite qu'une énergie de commutation très réduite. On peut dans ces conditions utiliser un interrupteur de très faible puissance pour établir ou couper le courant passant dans des ensembles dissipant une puissance beaucoup plus grande sans jaillissement d'arc, ni piqûre de l'interrupteur. Pour distinguer ce mode d'action d'autres qui vont suivre, on utilise en général l'expression commande progressive pour décrire ce type de commutation ou de déclenchement.

Considérons, pour commencer, le circuit de la figure 20 dans lequel on se sert d'un petit interrupteur pour commander le

passage du courant dans une charge assez importante. Lorsque l'interrupteur *I* est fermé, la grille du thyratron est rendue nettement plus négative que son potentiel limite pour la tension anodique particulière appliquée. Quand on ouvre l'interrupteur *I*, la grille revient instantanément au potentiel du sol (même potentiel que la cathode), de telle sorte que la polarisation négative est nulle. Le thyratron s'amorce, permettant au courant de passer dans la charge, on notera toutefois que le fait de fermer l'interrupteur *I* à cet instant n'interrompera pas le passage du courant

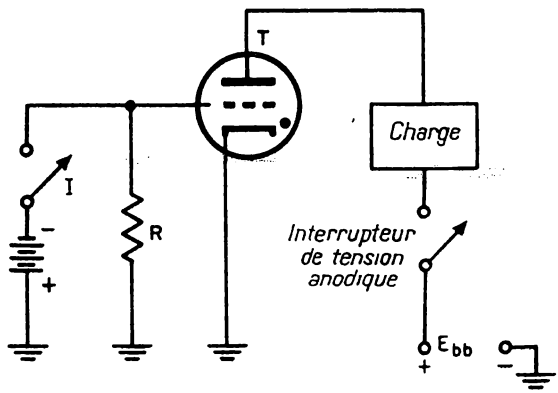

Fig. 20. — Fonctionnement d'un thyratron en déclencheur.

dans la charge pour des raisons indiquées à la section 22. On ne peut couper le courant dans ce montage qu'en coupant la tension anodique (on montrera plus loin comment on peut monter un autre petit interrupteur permettant aussi bien de faire passer un courant que de le couper. L'interrupteur servant à couper la tension anodique dans ce circuit devra être suffisant pour résister à l'arc de coupure).

On observera que le thyratron du circuit de la figure 20 se comporte comme un relais de verrouillage. Si l'on n'appuie — ne fût-ce que momentanément — sur un interrupteur à ressort de rappel placé en *I*, le courant circulera de manière continue dans la charge. Le thyratron possède cependant certains avantages importants par rapport à un relais électromagnétique : il ne comporte pas de contacts mobiles susceptibles de se corroder et

de se piquer ; les relais ordinaires exigent qu'on applique une impulsion relativement longue à leurs enroulements pour les faire fonctionner à coup sûr — au moins 1/100 de seconde même pour de bons relais. Le thyratron, par contre, a un temps de désionisation de quelques microsecondes au plus, de telle sorte qu'une fermeture de durée même un peu supérieure à ce bref temps de désionisation suffira pour la commande du circuit.

Parmi les divers gaz qu'on utilise dans les thyratrons, il y en a trois qui sont plus particulièrement employés actuellement pour les raisons indiquées ci-dessous :

Vapeur de mercure. — Faible chute de tension intérieure, peut laisser passer des courants intenses. Inconvénient : sensible aux variations de température et, par conséquent, commande plus difficile du thyratron.

Argon. — Chute de tension intérieure plus élevée que dans le cas du mercure, mais insensibilité aux variations de la température ambiante. On utilise les tubes à l'argon dans les circuits à faible charge, où la reproductibilité est importante.

Hydrogène. — Temps de désionisation extrêmement court ; donne par conséquent d'excellents résultats dans les applications où l'on dispose d'impulsions très courtes pour le déclenchement.

25. Commande de thyratron par condensateur

On a indiqué à la section 24 que l'extinction d'un thyratron amorcé opérant en courant continu peut être obtenue par des moyens autres que l'emploi d'un gros interrupteur à courant fort. Parmi les divers moyens permettant de réaliser cette extinction, la méthode du *condensateur de commutation* branché de la manière indiquée sur la figure 21 est peut-être la plus simple et la plus facile à appliquer. Les deux interrupteurs I_1 et I_2 comportent chacun un ressort de rappel, I_1 étant fermé au repos et I_2 ouvert au repos. Pour déclencher l'amorçage du thyratron, on ouvre I_1 pendant un court instant, ce qui met la grille à la masse par l'intermédiaire de R_1 et permet au tube de s'amorcer puisque, lorsque la grille est reliée à la masse, sa tension est plus positive que la valeur limite correspondant aux conditions dans lesquelles se trouve le tube. Un courant anodique

passe alors dans la charge et excite celle-ci mais, en même temps, le condensateur de commutation C se charge avec la polarité indiquée sur la figure 21, pour les raisons suivantes : lorsque T est conducteur il se comporte comme une résistance de très faible valeur, de telle sorte que l'armature de gauche de C acquiert un potentiel très voisin de celui du pôle négatif de E_{bb}. L'armature de droite de C est reliée au pôle positif de E_{bb} par R_2 et puisque aucun courant permanent ne passe par R_2, il n'y a aucune chute

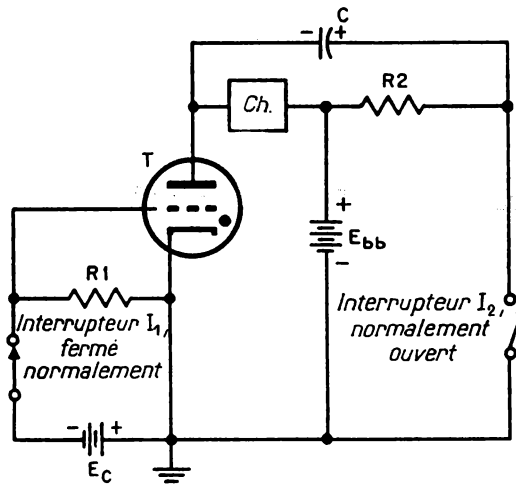

FIG. 21. — Circuit de coupure à thyratron comportant un condensateur de commutation.

de tension dans cette résistance ; par conséquent, cette armature de droite acquiert un potentiel égal à celui du pôle positif de E_{bb}. Par conséquent, la tension totale aux bornes de C est égale à E_{bb} moins la chute de tension dans le tube, d'environ 15 volts. Quand on ferme I_2, on applique instantanément la tension aux bornes de C à l'anode et à la cathode de T ; comme cette tension est de sens opposé à la tension d'alimentation normale, elle se retranche de cette dernière, abaissant la tension anode-cathode jusqu'à 15 volts environ, valeur bien inférieure à la tension nécessaire pour entretenir l'arc ; par conséquent, certains thyratrons se désamorcent alors. Quand on lâche I_2, T ne se rallume pas parce que I_1 est fermé au repos et que E_c est

branché entre la grille et la cathode avec la polarité correcte, permettant de maintenir la grille à une tension inférieure à sa tension limite.

Il sera nécessaire, dans certains cas, d'amener l'anode à une tension bien inférieure à 15 volts pour éteindre le tube, puisqu'il arrive que la chute de tension normale aux bornes du tube soit bien inférieure à cette valeur. Ce circuit rend en général l'anode négative par rapport à la cathode afin de rétablir la commande par la grille. La différence de potentiel entre l'anode et la cathode qui existe à l'instant où l'on appuie sur I_2 dépend des valeurs du condensateur C et de la charge Ch.

26. Le thyratron dans un circuit à courant alternatif

L'éclairage des scènes de théâtre et de music-hall, la galvanoplastie et la soudure, sont quelques exemples d'opérations industrielles dans lesquelles on a besoin d'un courant redressé d'intensité réglable. On peut réaliser ce réglage à l'aide d'un transformateur à puissance variable ou d'un rhéostat dans le circuit de sortie du redresseur ; mais ni l'une ni l'autre de ces méthodes ne donne de résultats particulièrement satisfaisants. Les transformateurs à puissance variable sont coûteux et les rhéostats dans le circuit de sortie abaissent considérablement le rendement. La réalisation de thyratrons de grande puissance et d'un prix relativement peu élevé a permis d'effectuer le réglage de l'intensité du courant à peu de frais et avec un rendement élevé. Avant d'essayer de réaliser des circuits de commande à courant alternatif, il est essentiel de comprendre les relations entre les potentiels de grille et d'anode dans les circuits à courant alternatif.

Bien que la courbe de tension limite de grille soit le plus souvent suffisante, dans le cas d'un thyratron 884 par exemple, pour prévoir le comportement du tube dans un type quelconque de circuit, une étude plus poussée du comportement en courant alternatif est réalisable en transformant les coordonnées de la courbe 18 A en un tracé sinusoïdal. Considérons un circuit comme celui de la figure 22 dans lequel on dispose d'une source de courant continu pour modifier la polarisation négative appliquée à la grille du thyratron, et dans lequel le potentiel anodique est une tension alternative sinusoïdale.

Puisque la courbe de la figure 18 A indique le potentiel grille minimum nécessaire pour rendre le tube conducteur pour toutes les valeurs de la tension anodique, on peut déterminer point par point la tension grille limite déclenchant juste la conduction pour un thyratron 884 en chaque point du cycle de la tension sinusoïdale à l'aide de la figure 18 A. Dans la figure 22 B, la portion en trait continu d'onde sinusoïdale au-dessus de l'axe des abscisses représente la tension d'anode qui provoquera l'allumage du thyratron si la tension grille est inférieure à la valeur limite ; la partie en *trait interrompu* de la courbe représente la tension

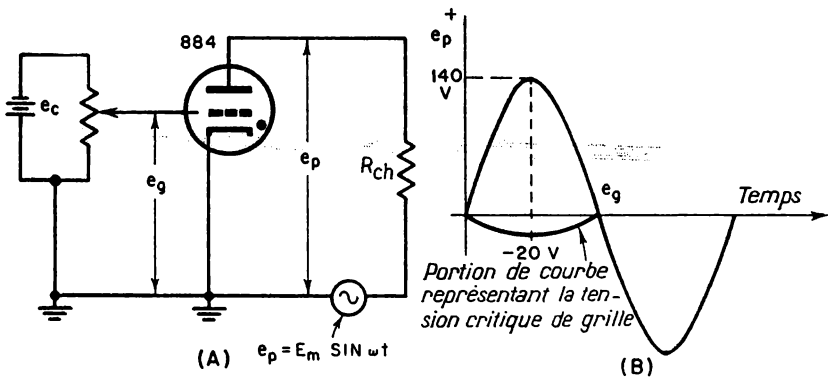

FIG. 22. — Circuit de thyratron à courant alternatif.

anodique négative qui ne peut en aucun cas provoquer l'amorçage du thyratron, et l'on peut, par conséquent, la négliger complètement. La courbe en trait continu au-dessous de l'axe des temps indique la manière dont la tension de grille critique doit varier en fonction de la tension d'anode pour empêcher tout juste le tube de s'amorcer pendant toute la durée de l'alternance positive de la tension anodique. Supposons, par exemple, que la valeur maximum de e_p soit de 140 volts. Il faudra que la tension e_g soit de — 20 volts pour la tension anodique de crête, si l'on veut tout juste empêcher l'amorçage du thyratron. Il faut évidemment associer à chaque tension anodique une valeur bien déterminée de la tension négative de grille pour établir ce régime. La portion de courbe de la figure 22 B donnant la tension limite de grille est le lieu géométrique de ces points pendant toute l'alternance positive de la tension anodique.

En se reportant à la figure 23, on peut étudier l'intensité et la forme d'onde du courant qui passe dans la charge (i_p) à titre de première étape dans la compréhension du comportement du thyratron dans les circuits à courant alternatif. Supposons qu'on applique une certaine tension de polarisation fixe e_g à la grille. La droite correspondant à cette polarisation coupe la branche de courbe correspondant à la tension limite de grille au point X

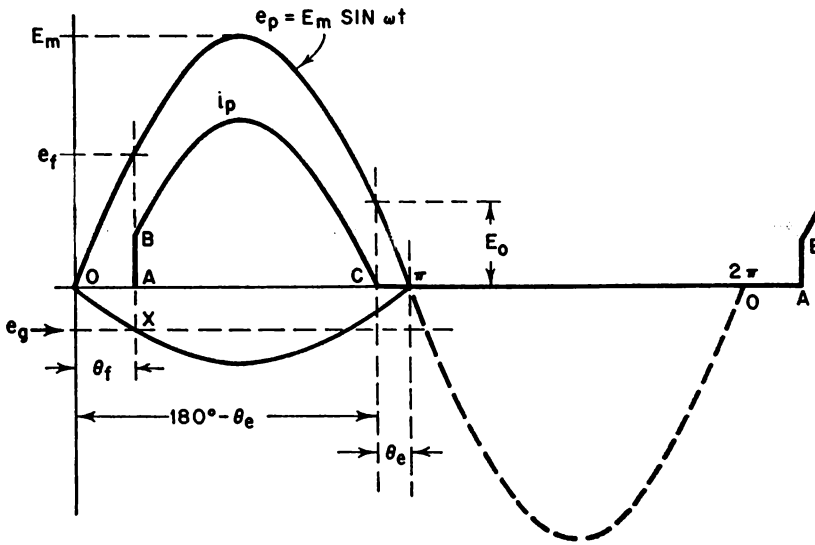

FIG. 23. — Relations entre la tension anodique, le courant anodique, et la tension grille dans un thyratron type.

de la figure 23. Ceci signifie que le tube commencera à conduire quand la tension appliquée atteindra la valeur e_f, — autrement dit le point au-dessus du point d'intersection, X, sur la verticale passant par ce point. Par conséquent le tube est éteint pendant l'intervalle de temps OA. Le thyratron s'allume en A et son courant I_P (en négligeant le temps — inférieur ou égal à 1 microseconde — d'ionisation) atteint instantanément la valeur correspondant au point B. Pendant le reste de la période de conduction i_p obéit à la loi d'Ohm conformément à l'équation

$$i_p = \frac{E_m \cdot \sin \omega t - E_o}{R_{ch}}$$

dans laquelle E_o est la chute de tension aux bornes du thyratron conducteur (entre 10 et 15 volts), E_m la valeur de crête de la tension sinusoïdale appliquée, et R_{ch} la résistance de la charge. Tout ceci rend compte de la forme de la courbe représentative de i_p.

A l'instant où e_p atteint une valeur égale à la chute de tension e_o dans le tube, i_p doit être égal à zéro. Si l'on désigne par Θ_f le temps correspondant à l'allumage, et par Θ_e l'angle correspondant à l'extinction, on peut écrire la relation ci-dessous :

$$e_p = E_m \sin \omega t \tag{18}$$

Dans ce cas, e_p est la tension appliquée. Avant l'amorçage toutefois, la tension anodique du tube est égale à la tension appliquée en l'absence de courant anodique. Par conséquent :

avant l'amorçage $e_p = e_{bb}$ (19)

La tension e_f correspondant au début de l'amorçage est :

$$e_f = E_m \sin \Theta_f \tag{20}$$

L'équation (20) nous donne, pour l'angle d'amorçage :

$$\Theta_f = \text{arc sin } e_f/E_m \tag{21}$$

Le thyratron s'éteint quand la tension alternative anodique appliquée devient inférieure à E_o. Par conséquent, l'angle d'extinction est lié aux diverses tensions par la relation :

$$E_o = E_m \sin (180^o - \Theta_e) \tag{22}$$

Calculant Θ_e d'après (22) :

$$\Theta_e = 180^o - \text{arc sin } E_o/E_m \tag{23}$$

Par conséquent, l'angle total de conduction peut être exprimé par :

$$\Theta_c = \Theta_e - \Theta_f \tag{24}$$

Ces équations ont une valeur propre du fait qu'elles lient les tensions d'amorçage et d'extinction (ou désamorçage) aux angles correspondants de l'alternance positive du courant appliqué. Un autre avantage lié à l'établissement de ces équations est le fait qu'il est maintenant possible d'établir une formule

donnant l'*intensité moyenne du courant débité dans la charge* par un thyratron pendant une période entière du courant alternatif. L'établissement de l'équation finale exige l'emploi du calcul intégral et l'on se contentera de l'indiquer sommairement, dans la note au bas de la présente page (1).

On peut écrire, par conséquent, dans ces conditions :

$$I_{\text{moy}} = \frac{E_m}{2\pi R_{ch}}(1 + \cos \Theta_f) \qquad (25)$$

On obtient cette forme (simplifiée) de l'équation finale en admettant que E_o est bien inférieur à E_m. C'est parfaitement exact dans la plupart des applications puisque E_o est voisin de 15 volts et que E_m dépasse souvent 800 volts pour les thyratrons industriels.

L'équation (25) montre que la valeur moyenne de l'intensité du courant continu passant dans la charge peut être contrôlée de manière progressive en changeant la polarisation de la grille puisque les changements de la tension de polarisation modifient la position de l'angle d'allumage sur l'axe des temps. Le réglage de l'intensité du courant de sortie des thyratrons en agissant sur la valeur de la polarisation de grille peut être appelé *commande*

(1) Calcul de I_{moy}.

$$I_{\text{moy}} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} i_p \, \mathrm{d}(\omega t) \qquad \text{(formule générale)}$$

Pour la période d'allumage s'étendant de Θ_f à Θ_e, on intégrera entre les limites de la dite période, et en remplaçant i_p par sa valeur, donnée par l'équation (17), on obtient :

$$I_{\text{moy}} = \frac{1}{2\pi}\int_{\Theta_f}^{\Theta_e} \frac{E_m \sin \omega t - E_O}{R_{ch}} \, \mathrm{d}(\omega t)$$

Le calcul de cette intégrale nous donne :

$$I_{\text{moy}} = \frac{E_m}{2\pi R_{ch}}\left[\cos \Theta_f + \sqrt{1 - \left(\frac{E_0}{E_m}\right)^2} - \frac{E_o}{E_m}(\Theta_e - \Theta_f)\right]$$

Si E_0 est nettement inférieur à E_m — ce qui est le cas, en général — on peut écrire cette équation sous la forme simplifiée :

$$I_{\text{moy}} = \frac{E_m}{2\pi R_{ch}}(1 + \cos \Theta_f)$$

(Puisque, dans l'hypothèse $E_0 \ll E_m$, le second terme se réduit à 1, tandis que le troisième s'annule.)

progressive ou *quantitative* par la grille. Les limites de variation de l'angle d'allumage, dans le cas de la commande par tension continue de grille sont 0° et 90°, l'intensité maximum du courant dans la charge correspondant à $\Theta_f = 0°$.

27. Commande par déphasage d'un thyratron

Un grave défaut de la commande par polarisation grille ou progressive des thyratrons décrite à la section 26 est qu'on ne peut faire varier l'angle d'amorçage que dans une gamme très limitée, entre 0° et 90°. Un thyratron à commande progressive dans un circuit à courant continu se comporte comme un relais à verrouillage automatique, parce qu'une fois que la décharge a été amorcée, la grille cesse de commander le fonctionnement et la tension anodique reste supérieure à celle entretenant l'arc à l'intérieur du tube (et ce dernier continue à conduire tant que la tension dépasse 15 volts). Comme on l'a vu, cependant, on peut faire varier le courant passant par le thyratron et sa charge dans un circuit à courant alternatif en agissant sur la tension grille ; la grille peut aussi commander à nouveau le tube à chaque demi-période de même sens de la tension anodique appliquée quand cette dernière passe par la valeur zéro.

Un examen approfondi montre manifestement que la commande progressive par la grille ne permet jamais de régler complètement (de I_o à I_{max}) le courant anodique du régime « blocage à 100 % » au régime « blocage nul », à cause de la limitation de 0° à 90°. Pour éclaircir ce point, considérons les deux cas extrêmes suivants : 1) Si l'on donne à l'angle d'amorçage Θ_f la valeur 0°, le tube sera conducteur pendant une alternance presque complète. C'est le régime de « blocage nul ». 2) Si l'on amène l'angle d'amorçage à être très voisin de 90°, le thyratron s'amorcera pour la valeur maximum de la tension d'anode, mais *restera amorcé pendant le reste de l'alternance, soit un quart de période.* Ce *n'est donc pas* le régime de blocage à 100 %. C'est ainsi que si la charge du circuit anodique était une lampe à incandescence, l'intensité de la lumière émise par cette lampe diminuerait au fur et à mesure qu'on augmenterait la polarisation négative de grille ; mais bien avant qu'on atteigne le régime d'« extinction presque complète » de la lampe, elle s'éteindra

totalement. Cette situation serait inadmissible dans une application importante comme l'éclairage des parties d'un théâtre autres que la scène.

On peut régler complètement (de zéro à sa valeur maximum) le courant circulant dans la charge d'un thyratron en appliquant une commande par déphasage destinée à faire varier l'angle d'allumage de 0° à 180°. Pour réaliser la commande par déphasage, on applique une tension alternative de même fréquence que la tension d'alimentation de l'anode à la grille du tube. On

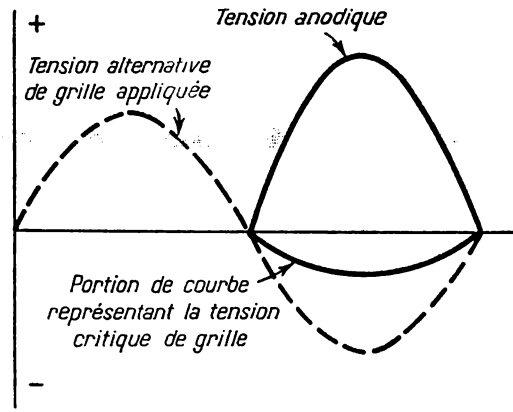

FIG. 24. — On applique à la grille une tension alternative de grande amplitude déphasée de 180° par rapport à la tension anodique.

fait varier l'angle de phase de la tension de grille à l'aide de circuits appropriés qui seront décrits en peu de mots. Pour commencer, appliquons une tension alternative de grille, déphasée de 180° par rapport à la tension d'anode et de tension de crête beaucoup plus négative que cela n'est nécessaire pour maintenir le thyratron à l'extinction pendant la totalité de l'alternance.

La figure 24 montre très clairement que le thyratron ne peut, dans ces conditions, s'amorcer à n'importe quel moment, parce que la tension de grille appliquée est toujours plus négative que la tension critique de grille. Pendant l'alternance suivante, la grille deviendra, naturellement positive mais le potentiel anodique sera, au même instant, négatif, de telle sorte qu'on réalise l'extinction permanente pendant la totalité des 360°. On peut

considérer le déphasage relatif entre les tensions de grille et d'anode comme une avance ou un retard de 180°.

Si l'on modifie la phase de la tension grille de manière à l'amener à une nouvelle valeur, telle celle représentée sur la figure 25, il sera logique de dire que la tension grille est maintenant en retard d'un angle inférieur à 180° par rapport à la tension anodique. La tension appliquée à la grille coupe alors la portion de courbe correspondant à la tension critique au point X et une

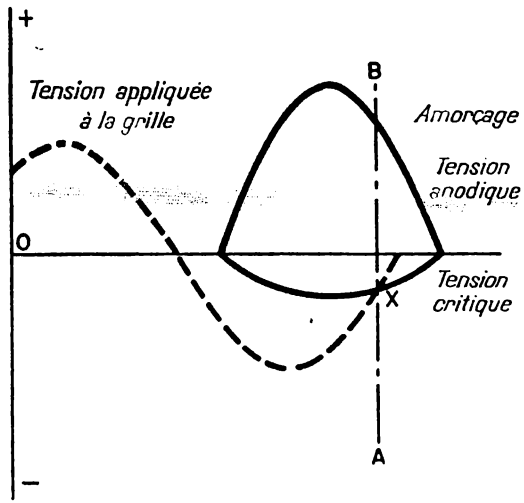

FIG. 25. — La tension alternative appliquée à la grille est maintenant déphasée en arrière d'un angle inférieur à 180° par rapport à la tension anodique.

droite tracée parallèlement à l'axe des ordonnées coupe la courbe de tension anodique au point F (droite AB). Par conséquent, le thyratron s'amorce maintenant au point F, et reste conducteur pendant, pratiquement, tout le reste de l'alternance. Il est évident que si l'on avance la phase de la tension grille de manière à réduire de plus en plus son retard sur la tension anodique, le tube pourra s'amorcer de plus en plus tôt. Quand la tension de la grille sera juste en phase avec la tension anodique, le thyratron s'amorcera juste au moment où la tension anodique dépassera le potentiel d'ionisation au début du cycle, et continuera à conduire pendant la totalité de l'alternance ; c'est ce

qu'on peut appeler le régime de blocage nul. Par conséquent, la commande par déphasage permet d'obtenir une gamme complète de courants anodiques variant graduellement entre une intensité nulle (blocage à 100 %) et l'intensité maximum (blocage nul). Il ne reste plus qu'à étudier un circuit permettant de faire varier la phase du potentiel grille de 0° à 180° par rapport au potentiel anodique.

28. Circuits déphaseurs

Il est facile de déphaser une tension par rapport à une autre à l'aide de circuits déphaseurs comportant des résistances associées à des inductances ou des capacités. Un des montages les plus faciles à réaliser et à régler est le circuit *RC* représenté sur la figure 26. Un transformateur basse tension à prise médiane

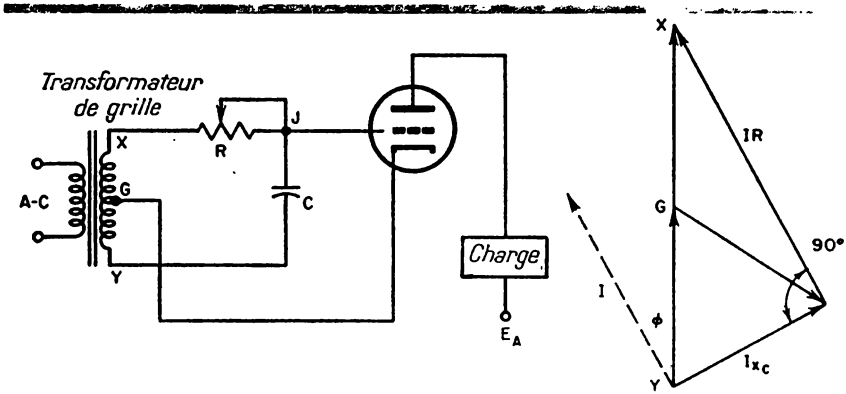

FIG. 26. — Réseau déphaseur à résistance et capacité.

fournit la tension alternative de polarisation du thyratron, grâce à une résistance variable *R* et un condensateur *C* branchés aux bornes de l'ensemble de l'enroulement secondaire. On prend la tension grille au point commun entre *R* et *C*, et elle est définie par rapport au point *G* auquel est reliée la cathode.

Si l'on prend le point *Y* comme origine, le courant qui circule à travers l'ensemble *RC* grâce à la tension *YX* appliquée doit être en avance sur E_{YX} d'un angle Θ qui est fonction du quotient de la réactance capacitive $1/\omega c$ par la résistance *R*. Le diagramme vectoriel de la figure 26 montre que *I* avance d'un angle Θ sur

E_{yx}. La chute de tension dans la résistance doit être en phase avec ce courant, autrement dit, le vecteur JX doit être tracé parallèle au vecteur I ; d'autre part, la différence de potentiel aux bornes du condensateur doit être en retard de 90° sur le courant ; le vecteur JY est donc représenté perpendiculaire à I et à RI. Puisque la somme des vecteurs JY et JX doit être égale aux vecteur XY, ces vecteurs forment un triangle fermé dans lequel le vecteur JG représente l'amplitude et la phase de la tension variable appliquée entre la grille et la cathode du thyratron. Le vecteur JG est par conséquent en retard sur le vecteur GX, condition nécessaire pour obtenir une tension de grille variable dont on peut changer la phase pour réaliser une commande par la grille.

Examinons le diagramme vectoriel de la figure 26 : si l'on donne à R la valeur zéro, le vecteur devient JX égal à zéro, tandis que la tension grille JG est en phase avec la tension appliquée à l'anode. Ceci permet au thyratron de s'allumer au début de chaque cycle, laissant ainsi passer le courant anodique moyen maximal. Quand on augmente la résistance, le vecteur JX croît, ce qui provoque une augmentation de l'angle entre les vecteurs « tension grille » et « tension anodique ». A mesure qu'on augmente le retard de la tension grille, le tube s'amorce plus tard dans le cycle, ce qui provoque une diminution de plus en plus grande du courant anodique. La commande de la grille par déphasage permet de faire varier de manière très progressive le courant anodique moyen, à l'aide d'un élément R de commande de wattage relativement faible.

29. Résistance de grille du thyratron et courant de préconduction

Dans l'étude du comportement de principe d'un thyratron, on a signalé que le tube s'allumait quand le potentiel négatif diminuait en valeur absolue au-dessous d'un certain point critique. Après l'amorçage on ne peut plus couper le courant anodique d'un thyratron en rendant la grille à nouveau négative puisque cette dernière électrode ne peut plus exercer aucune action de commande une fois que l'ionisation a commencé.

Afin de comprendre :

1° les conditions physiques qui existent après l'amorçage d'un thyratron et

2° pourquoi le tube est « en danger » à moins qu'on ne prenne certaines précautions,

étudions la répartition des tensions à l'intérieur du tube.

Bien qu'une tension de plusieurs centaines de volts puisse exister entre l'anode et la cathode avant que l'amorçage ne se produise, cette tension s'abaisse jusqu'à une valeur inférieure, 15 volts par exemple. La grille du tube est alors plongée à cet instant dans un champ ayant un gradient de potentiel déterminé par la tension entre l'anode et la cathode, de l'ordre de 15 V par exemple. La grille tendra par conséquent à acquérir un potentiel voisin de 15 volts et toute tentative de modifier cette tension — en agissant par exemple sur la tension de polarisation — fera apparaître des courants grille intenses. Pour éviter d'endommager le tube, on branche toujours une résistance entre la source de tension et la grille. Si la valeur de cette résistance est comprise entre 15 000 et 100 000 ohms, une résistance de cette valeur permettra à la grille de prendre son potentiel propre avec un très faible courant grille. Comme du fait du courant de préconduction, une certaine tension peut apparaître aux bornes de cette résistance, la valeur de cette résistance influera sur la courbe de tension critique de grille.

Un autre facteur a de l'importance en ce qui concerne l'emploi des thyratrons : le courant grille de préconduction. L'intérêt du thyratron en tant que relais à verrouillage automatique est la faible valeur de la puissance nécessaire pour la commande par la grille du tube, avant le début de la conduction. La surface commandée est beaucoup plus grande que l'élément équivalent d'un tube à vide poussé ; en outre, la grille du thyratron est plongée dans le plasma pendant la conduction et recueille inévitablement une quantité appréciable de la matière de la cathode.

Une mesure montre qu'un thyratron normal en bon état donne lieu à un courant de grille beaucoup plus intense avant la conduction qu'un tube à vide. Ceci signifie, évidemment, que la source de tension de commande pour la grille doit être capable de fournir une certaine puissance plutôt que, simplement, une

tension. On remédie presque totalement à cet inconvénient grâce au thyratron à grille-écran.

30. Thyratrons à grille-écran

La figure 27 représente l'intérieur d'un thyratron à grille-écran type. On a pris, dans ce tube, des précautions, du point

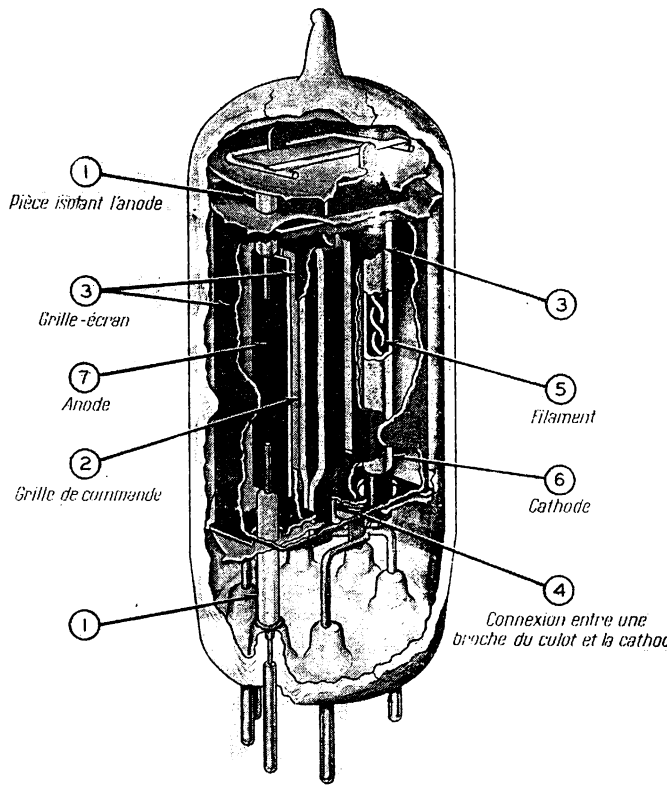

FIG. 27. — Structure d'un thyratron type à grille-écran (2 D 21, fabrication R.C.A./U.S.A.).

de vue construction, pour isoler la grille de commande du courant d'électrons et d'ions qui circulent entre l'anode et la cathode.

La grille-écran est un ensemble cylindrique qui entoure complètement la cathode et la grille de commande, et est pourvu

de deux plaques déflectrices qui limitent le courant correspondant à l'arc à un ensemble de trajets situé bien à l'intérieur de la structure métallique de la grille de commande. En isolant la grille de commande de cette manière, on réduit au minimum à la fois le courant de préconduction et la probabilité d'un courant grille de préconduction susceptible de provoquer des dégâts. Des résistances série de protection sont en général inutiles dans le circuit grille d'un thyratron à grille-écran. Des résistances série dans les circuits de grille et de grille-écran augmentent

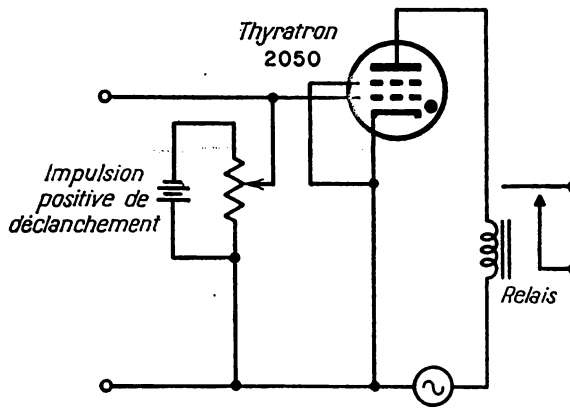

FIG. 28. — Montage du thyratron en interrupteur non verrouillé.

parfois la durée utile du tube dans certaines applications des thyratrons.

On emploie en général les petits thyratrons à grille-écran, comme le thyratron 2050 (U.S.A) en reliant leur grille-écran à leur cathode, la dite grille-écran étant ainsi au potentiel zéro. En utilisant ce montage, avec 150 volts entre l'anode et la cathode le thyratron 2050 s'amorcera quand le potentiel de grille atteindra — 2 volts environ. La figure 28 représente un thyratron 2050 monté en interrupteur non verrouillé et ne nécessitant qu'une puissance de commande infinitésimale, appliquée à la grille. Le circuit doit sa caractéristique de non-verrouillage à l'emploi de courant alternatif pour l'alimentation de l'anode. Pour transformer l'ensemble en relais à verrouillage, il faut alimenter le circuit anodique en courant continu au lieu de courant alternatif.

La grille-écran peut être utilisée comme grille de commande. Certaines applications tirent parti du fait qu'on peut réaliser des circuits dans lesquels le thyratron à grille-écran ne sera conducteur que quand le potentiel des deux grilles dépasse une certaine valeur critique.

31. Deux applications directes des thyratrons industriels

Un thyratron est essentiellement un redresseur à commande par la grille qui peut remplacer un tube redresseur à vide poussé dans un circuit dans lequel on désire agir sur la tension de sortie. Il est par conséquent naturel qu'on ait pensé à cela comme

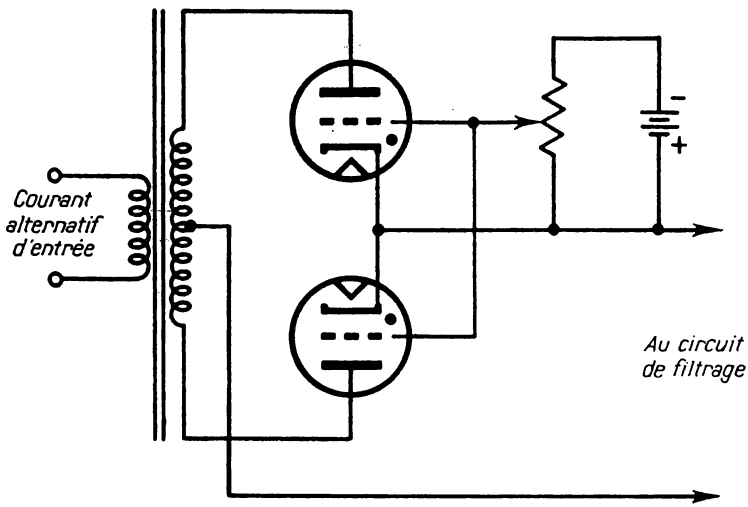

FIG. 29. — Bloc d'alimentation à deux alternances à thyratron.

première application. Signalons à ce propos que la plupart des thyratrons ne sont pas du tout utilisés comme redresseurs, puisque la plupart des applications industrielles demandent un dispositif commandant la puissance de sortie en courant alternatif *sans redressement* de ce dernier. On peut citer comme exemples la commande des machines à souder par résistance et des gros moteurs à courant alternatif. D'autre part, la commande du courant et le redressement sont souvent nécessaires. Par

conséquent, les circuits à thyratrons se subdivisent en deux grandes catégories : ceux à commande de courant continu et ceux à commande de courant alternatif.

La figure 29 représente un bloc d'alimentation à thyratron à deux alternances destiné à alimenter un filtre en courant continu pulsé. On fait varier le courant de sortie, dans ce cas, en utilisant la commande progressive par la grille mais on peut facilement utiliser à la place les procédés par déphasage en employant des circuits décrits précédemment dans ce chapitre.

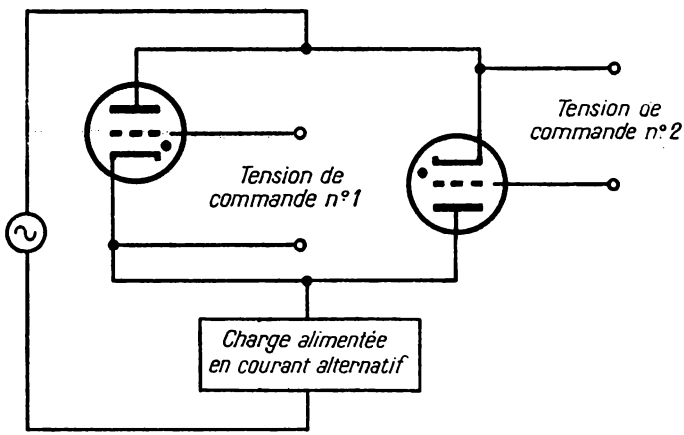

FIG. 30. — Mode de connexion tête-bêche de deux thyratrons pour l'alimentation d'une charge en courant alternatif.

Pour la commande du courant alimentant les transformateurs ou les moteurs à courant alternatif, on peut monter deux thyratrons *tête-bêche* (cathode contre cathode) de la manière représentée sur la figure 30. Dans ce circuit, chaque thyratron est conducteur pendant une alternance du courant alternatif d'entrée, et fournit une sinusoïde complète à la sortie de l'ensemble. Ce montage exige deux tensions de commande séparées comme l'indique le schéma de la figure 29, car il n'y a pas de point commun pour le retour du pôle positif de la source de tension grille. Quand les tubes sont bloqués, ils se comportent comme des interrupteurs ouverts, et la tension totale du secteur apparaît entre les deux cathodes. Avec les thyratrons modernes il serait impossible d'alimenter les deux filaments par un transformateur

de chauffage commun, puisque l'isolement entre la cathode et le filament n'est pas suffisant pour empêcher un jaillissement d'arc éventuel d'une électrode à l'autre. Cette limitation de la tension filament-cathode dans les thyratrons est due au fait qu'un courant de fuite de quelques microampères peut provoquer une ionisation conduisant au jaillissement d'une décharge disruptive entre le filament et la cathode. Ce phénomène est, en général, négligeable dans les tubes à vide. Il faut par conséquent prévoir deux sources entièrement distinctes pour l'alimentation des filaments, la tension d'isolement entre elles et entre les enroulements et les carcasses étant égale à la totalité de la tension du secteur. Beaucoup d'appareillages industriels utilisent ce montage avec commande de la grille par déphasage fournissant un courant de sortie à variation très progressive, variant entre zéro et l'intensité maximum de l'ensemble.

32. Les thyratrons dans les circuits à courant fort

La structure du thyratron, tout comme celle d'un tube à vide poussé, le rend plus apte à être utilisé dans les circuits à tension élevée et courant faible que dans les circuits à basse tension et à courant intense. Même les gros thyratrons industriels ne sont guère utilisables en régime continu pour des courants quelque peu supérieurs à 10 ou 15 ampères. Supposons, par exemple, qu'on utilise deux thyratrons de grande puissance pour commander l'éclairage d'un théâtre, avec un montage comportant 50 lampes de 500 watts. Si l'on admet que chacune de ces lampes consomme environ 3 ampères (sur un circuit dont la tension nominale est de 115 volts) cela signifie que le circuit d'alimentation des lampes devra fournir un courant total d'environ 250 ampères sous 115 volts.

Ce courant dépasse de beaucoup l'intensité nominale des thyratrons ; d'autre part, ces tubes sont utilisables pour des tensions bien supérieures à 115 volts. Ceci suggère immédiatement l'emploi d'un couple de transformateurs, l'un pour élever la tension appliquée et l'autre pour l'abaisser à sa valeur initiale. On peut utiliser le circuit de la figure 31. Si le rendement était de 100 %. la puissance dans les enroulements primaires des deux transformateurs devrait être exactement égale aux puissances dans leurs enroulements secondaires. Dans la pratique, où

comme le rendement des transformateurs employés est de l'ordre de 90 %, la puissance au primaire de T_1 serait de 10 % supérieure à la puissance au secondaire de ce dernier. Il en serait de même

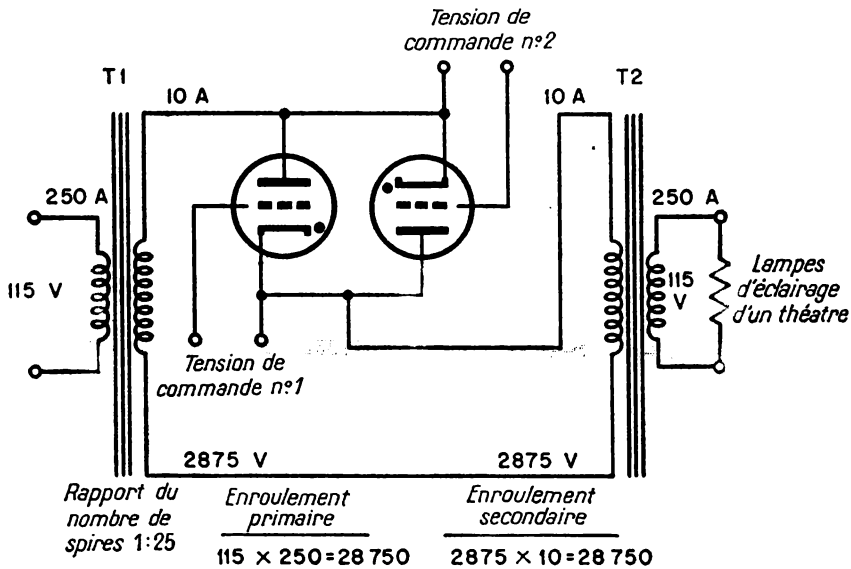

FIG. 31. — Mode d'utilisation de thyratrons à haute tension et courant faible pour le réglage du courant dans une charge consommant un courant élevé sous basse tension.

pour T_2. Par conséquent, le courant dans les thyratrons sera un peu supérieur à celui indiqué sur la figure, mais encore nettement inférieur à leurs intensités de courant nominales.

33. Circuits additionnels pour thyratrons

On peut trouver, dans les revues techniques et les manuels industriels d'innombrables circuits dans lesquels les thyratrons jouent un rôle important. On décrit ci-dessous deux montages dans lesquels on n'emploie les thyratrons ni comme éléments de commande, ni comme dispositif de déclenchement : ces circuits sont intéressants parce qu'on emploie les tubes d'une manière différente, et parce que ces circuits sont utilisés sur une grande échelle dans l'électronique moderne.

Circuit retardateur (fig. 32). — Quand l'interrupteur bipolaire est en position 1, le circuit anodique est coupé (couteau A) et la tension grille est sensiblement plus négative que la valeur critique (c'est-à-dire la tension critique pour ce tube quand on applique, ultérieurement, la tension anodique donnée). L'armature du condensateur C du côté de l'interrupteur se charge négativement puisque ce condensateur est branché entre les

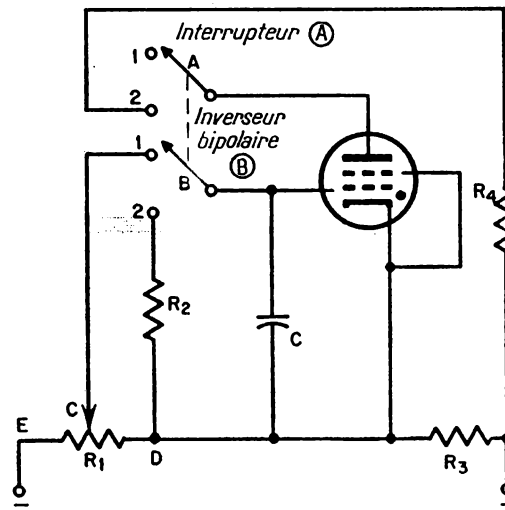

FIG. 32. — Réalisation pratique d'un circuit à temporisation.

points C' et D du potentiomètre de polarisation R_1. Il n'y a pas de courant dans la charge R_4 dans ces conditions.

Quand on amène l'interrupteur dans la position 2, l'anode est immédiatement mise sous tension, mais le courant anodique reste nul du fait qu'une tension supérieure à la tension critique est appliquée au circuit grille-cathode par la charge aux bornes C. Cette charge s'abaisse graduellement jusqu'à devenir nulle du fait que C se décharge à travers le couteau 2 de l'inverseur et la résistance R_2. Le tube s'amorce quand le potentiel grille tend vers celui de la cathode : autrement dit, l'allumage se produit dès que la tension grille atteint sa valeur critique. L'intervalle de temps qui s'écoule entre la manœuvre de l'interrupteur et le déclenchement du thyratron est déterminé par la tension ini-

tiale de charge fonction du choix de R_1 et par la constante de temps de l'ensemble R_2C. On peut augmenter cet intervalle de temps, en déplaçant le curseur de R_1 vers le point E ou en augmentant la résistance de R_2 et ou la capacité de C.

Circuit binaire à compteur (fig. 33). — Un compteur binaire

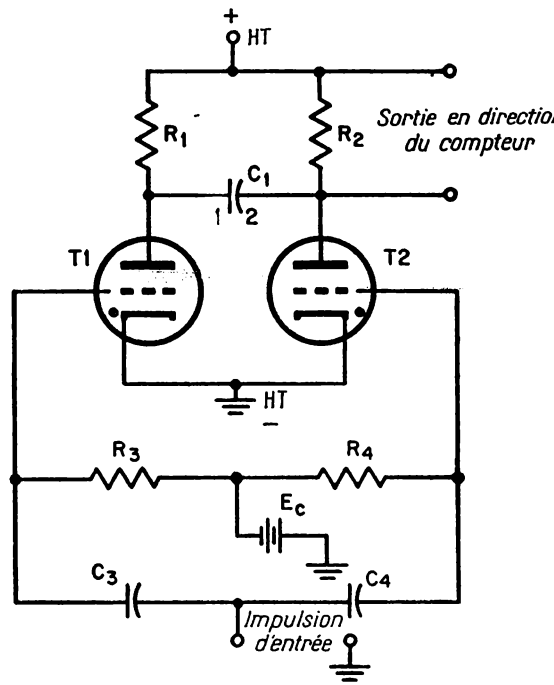

FIG. 33. — Circuit de compteur binaire basé sur le fonctionnement d'un thyratron.

équivaut à un diviseur de fréquence 2-1, dans lequel on compte mécaniquement toutes les impulsions successives appliquées à l'entrée. Dans de nombreuses applications scientifiques et industrielles, la fréquence de récurrence des impulsions à la sortie est trop élevée pour être mesurée par des compteurs « digitaux » (= numériques) électromécaniques.

Les compteurs numériques du type digital n'ont que rarement un fonctionnement sûr à des fréquences d'impulsions supérieures à environ 10 par seconde, alors qu'on rencontre souvent des

fréquences supérieures dans le triage, le comptage et les opérations de contrôle associées dans les services de fabrication.

On peut facilement transformer un couple de thyratrons en diviseur 2-1, ce couple peut être suivi, si on le désire, d'un second et d'un troisième couple, de manière à obtenir une division de fréquence en progression géométrique, 1-4 ; 1-8, etc.

Les deux tubes sont polarisés au delà de la conduction grâce à la tension négative fournie par E_c et appliquée à leurs grilles. On peut, cela étant, provoquer l'allumage de T_2 en reliant, momentanément, sa grille directement à sa cathode. Si l'on suppose maintenant qu'on applique une impulsion positive ayant un temps de montée trop bref (un front avant très abrupt) aux bornes d'entrée, il se passe ceci : Cette impulsion est transférée simultanément aux deux grilles par C_3 et C_4 mais cela n'affecte pas le comportement du thyratron T_2 qui est déjà conducteur. Par contre, T_1 s'amorcera si l'impulsion a une amplitude suffisante pour surmonter la tension négative de E_c, mais cet amorçage provoquera alors l'extinction instantanée de T_2. La conduction a, par conséquent, été transférée de T_2 à T_1.

L'extinction de T_2 à l'instant de ce transfert se produit de la manière suivante :

Du fait que T_2 est conducteur, C se charge jusqu'à une tension inférieure d'environ 15 volts à la tension d'alimentation et est polarisé de telle manière que son armature 1 est positive et son armature 2 négative (lorsque T_2 est conducteur, il se comporte comme un interrupteur fermé, avec une chute de tension intérieure d'environ 15 volts). L'armature 2 de C_1 est reliée à l'anode de T_1, tandis que l'armature 1 de C_1 est reliée au $+ HT$ à travers R_2. Comme T_1 n'est pas conducteur à cet instant, il n'y a pas de chute de tension le long de R_1, et C_1 doit se charger jusqu'à une tension égale à la tension appliquée, moins la chute de tension dans T_2.

L'amorçage de T_1 sous l'action de l'impulsion positive incidente est un phénomène presque instantané. Quand il se produit, la tension anodique de T_1 s'abaisse d'environ 15 volts. La charge d'un condensateur ne peut changer instantanément de telle sorte que, lorsque la tension de l'armature 1 de C_1 s'abaisse également à 15 volts, la cathode de T_2 (celle de T_1 aussi) acquiert instantanément un potentiel voisin de 15 volts dès que le tube T_1

devient conducteur. Mais l'anode de T_2 est fortement négative (du fait de la charge accumulée sur les armatures de C_1 par rapport à sa cathode dans les conditions imposées par cette nouvelle situation) et, par conséquent, T_2 doit se désamorcer. C_1 se recharge au bout de très peu de temps, cette fois avec une polarité opposée ; mais, si T_2 est désionisé avant que cette inversion de polarité ne se produise, il ne s'amorcera pas à nouveau puisque sa grille continue à être plus négative que sa tension critique.

Lors de l'arrivée d'une seconde impulsion, il se produit une nouvelle commutation. Par conséquent une impulsion seulement sur deux rend le tube T_2 conducteur, et le compteur constituant une partie de sa charge anodique n'enregistre que chaque deuxième signal (les signaux de rang *pair*, par exemple).

Questions relatives au présent chapitre

1. Quelle est la principale différence entre une diode à gaz et un thyratron ?
2. Indiquer pourquoi il est nécessaire de prévoir une charge anodique dans un montage à thyratron.
3. Pourquoi les variations de température affectent-elles la tension d'amorçage d'un thyratron à vapeur de mercure ?
4. Citer trois gaz utilisés dans les thyratrons.
5. Quel est le rôle du condensateur de la figure 21 ?
6. A quoi sert la grille-écran d'un thyratron ?
7. Indiquer deux dispositifs servant à la commande du courant dans les thyratrons.
8. Comment connecter les thyratrons pour obtenir un fonctionnement à onde entière ?
9. Quel est le type de circuit qui nous permettra d'agir sur l'intensité moyenne du courant, quand un thyratron est connecté dans un circuit à courant alternatif ?
10. Indiquer au moins deux circuits dans lesquels on n'utilise le thyratron ni comme élément de réglage, ni comme dispositif à déclenchement.

CHAPITRE 5

AUTRES TYPES DE TUBES A GAZ

34. Cellules photo-électriques à gaz

L'expression « cellule photo-électrique » signifie, dans le présent ouvrage, un dispositif sensible à la lumière qui est constitué par deux électrodes métalliques enfermées dans une enveloppe de verre. L'une de ces électrodes, la cathode, émet des électrons quand sa surface sensible est excitée par de l'énergie rayonnante ayant la longueur (ou les longueurs) d'onde pour laquelle elle est prévue. La seconde électrode, appelée anode, est utilisée avec un potentiel positif par rapport à celui de la cathode, et engendre un champ électrique grâce auquel elle attire les électrons émis par la cathode. Le nombre d'électrons intéressés par ce transfert est fonctioo de la sensibilité spécifique de la cathode pour la longueur d'onde du rayonnement émis, et de la quantité d'énergie rayonnante atteignant sa surface. Pour une cellule photo-électrique donnée recevant un rayonnement de longueur d'onde déterminée, l'intensité du courant anodique est fonction de la quantité d'énergie reçue par la cathode.

Les ampoules de beaucoup de cellules photo-électriques modernes sont vidées d'air de manière qu'il y règne un vide poussé (fig. 34). Lorsqu'on détermine les courbes caractéristiques donnant le courant anodique en fonction de la tension anodique à éclairement constant, le tube ne fonctionne pas du tout en régime de charge spatiale. La cellule photo-électrique diffère, dans ces conditions, d'une diode thermoionique. L'absence de charge spatiale s'explique par le fait que la cathode émet si peu d'électrons (même quand l'intensité du rayonnement est grande) qu'il suffit d'une très faible différence de potentiel anode-cathode pour atteindre l'équivalent de la saturation par limitation de

l'émission (température) de la cathode d'une diode thermo-ionique. Autrement dit, l'application d'une très faible différence de potentiel entre ces deux éléments provoquera l'attraction par l'anode de tous les électrons émis. La présence d'une petite quantité d'un gaz inerte comme l'hélium ou l'argon provoque un accroissement du courant anodique d'une cellule photo-électrique donnée pour un même éclairement, augmentant ainsi la sensibilité du tube par rapport aux types à vide poussé correspondants. Le mécanisme à l'origine de cette amélioration est très semblable à celui étudié antérieurement à propos du passage des courants de faible intensité dans les gaz :

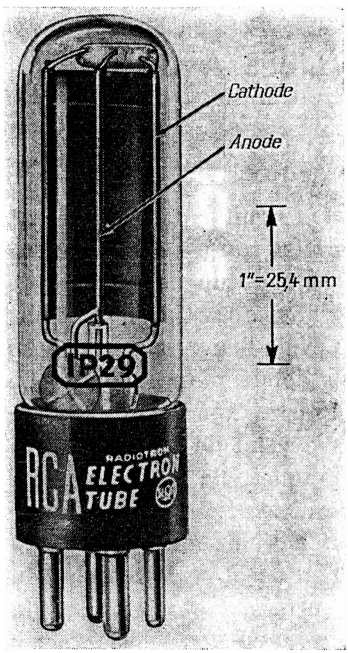

FIG. 34. — Vue en coupe d'une cellule photoélectrique à gaz 1 P 29 (photoémissive).

1) Le flux d'électrons primaires ou secondaires en provenance de la cathode provoque une ionisation du gaz.

2) Les collisions entre atomes rendent maintenant disponibles des électrons porteurs de charges qui s'ajoutent aux photo-électrons pour augmenter le nombre total d'électrons dans le tube.

3) Les ions positifs atteignant la cathode peuvent donner naissance à des électrons secondaires qui augmenteront encore le nombre total d'électrons se déplaçant entre la cathode et l'anode. Le courant total circulant dans une cellule photo-électrique à gaz peut être plusieurs fois plus intense que celui du tube à vide poussé correspondant, fonctionnant sous la même tension anodique et avec le même éclairement.

On peut tirer de nombreuses conclusions intéressantes des courbes de la figure 35. La diminution de pente de la caractéristique de la cellule photo-électrique à vide poussé dès que la

tension appliquée dépasse 40 volts environ montre que l'équivalent de la saturation limitée par la température de la cathode d'une diode thermoionique a été atteint en ce point, et qu'une nouvelle augmentation de la tension anodique n'a que peu d'influence sur le courant anodique. Pour les faibles tensions anodiques, l'intensité du courant débité par le tube à vide poussé est plus grande, mais dès que la tension anodique est portée au-delà d'environ 75 volts, c'est le tube à gaz qui devient le

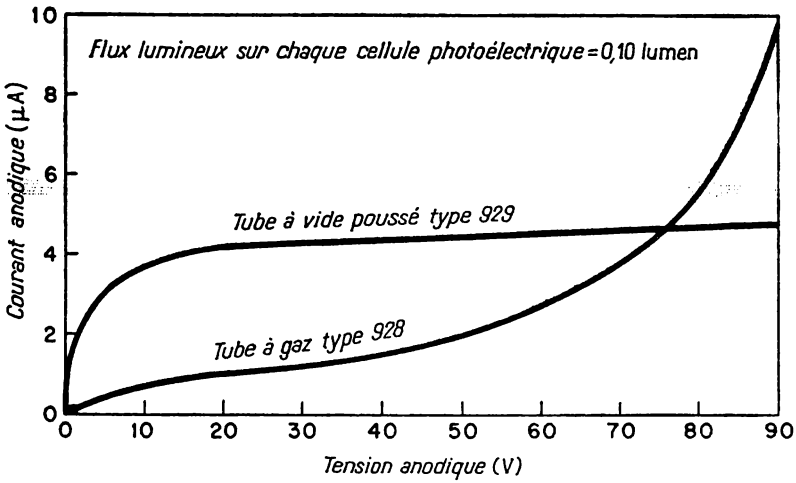

FIG. 35. — Comparaison d'une courbe caractéristique de cellule photoélectrique à gaz avec la courbe correspondante d'une cellule semblable à vide poussé.

plus intéressant à ce point de vue. Sous 90 volts, le courant dans le tube à gaz est à peu près double du courant dans le tube à vide poussé.

L'incurvation de la courbe correspondant au tube à gaz pour un potentiel anodique compris entre 60 et 90 volts indique une augmentation de l'ionisation et rend compte de l'accroissement rapide du courant anodique.

Les cellules photo-électriques américaines semblables au type 929 (868, 918, 923, etc.), ont une tension anodique maximum nominale de 90 volts. Comme on doit s'efforcer à tout prix d'empêcher la décharge lumineuse dans le gaz de devenir auto-entretenue, toute tentative d'augmenter la tension au-delà de

la valeur recommandée peut provoquer une décharge auto-entretenue qui détruirait rapidement la cathode par bombardement ionique.

35. Tube à gaz à cathode froide (tube à décharge de grille)

Les triodes à gaz et à cathode froides sont connues sous le nom de tubes à déclenchement, ou *tubes à gaz à cathode froide*

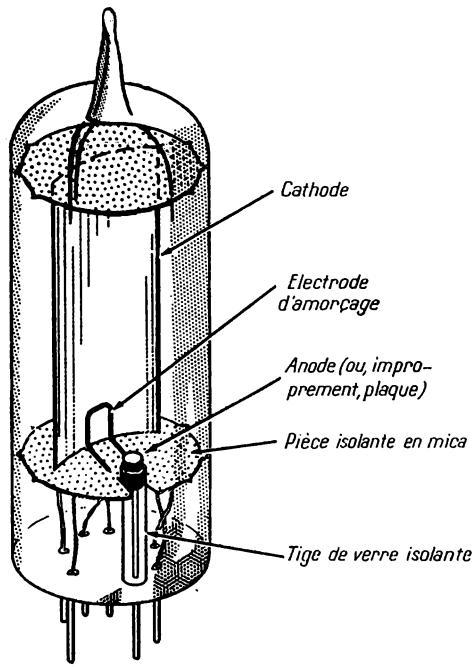

FIG. 36. — Structure d'une tube à gaz à cathode froide.

(fig. 36). On les range parfois dans la catégorie des tubes à décharge de grille, bien que le troisième élément soit à considérer plutôt comme une anode auxiliaire d'amorçage ou une électrode de commande plutôt que comme une grille.

La cathode est une électrode de ferronickel recouverte d'un mélange à base de sels de baryum et de strontium. L'anode est en général en nickel pur, et réalisée sous la forme d'un fil séparé

des autres électrodes par un cylindre de verre. L'extrémité du fil de nickel dépasse au-dessus de l'extrémité supérieure du cylindre de verre et est séparée des autres éléments par un intervalle qui dépend de la nature et de la pression du gaz, et de l'ensemble de la réalisation du reste du tube. L'anode d'amorçage peut être constituée par un petit élément de surface ou une boucle de fil placée au voisinage de la cathode. Le gaz utilisé est de l'argon, du néon, ou un mélange des deux.

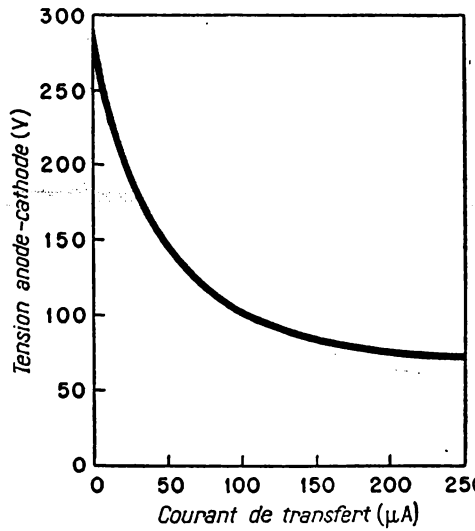

FIG. 37. — Caractéristique tension anodique-courant de transfert d'un tube OA4-G.

L'intervalle entre l'électrode d'amorçage et la cathode est nettement inférieur à l'intervalle entre l'anode et la cathode, de telle sorte qu'une décharge peut se produire pour une tension plus faible qu'entre les deux premières électrodes. A l'instant de cette décharge primaire, une ionisation se manifeste, et la décharge est transférée à l'anode principale. Il faut, pour que ce transfert se produise, régler la tension anode-cathode à une valeur bien déterminée, fonction du courant cathode-électrode d'amorçage, ou *courant de transfert*. La courbe représentée sur la figure 37 représente la relation entre la tension d'anode nécessaire et le courant de transfert. On notera que, pour un courant de transfert

nul, la tension d'anode nécessaire est égale à la tension qu'il faut pour amorcer la décharge en l'absence d'anode d'amorçage dans le circuit. Il est donc évident que, en pratique, la tension anodique est toujours inférieure à cette valeur provoquant un auto-amorçage, donc inférieure à 250 volts dans le cas de l'OA4-*G*. Cette tension à appliquer obligatoirement à l'anode diminue de plus en plus rapidement à mesure que le courant de transfert augmente, ce qui indique un accroissement de l'ionisation. La figure 38 représente un circuit de base permettant de se servir

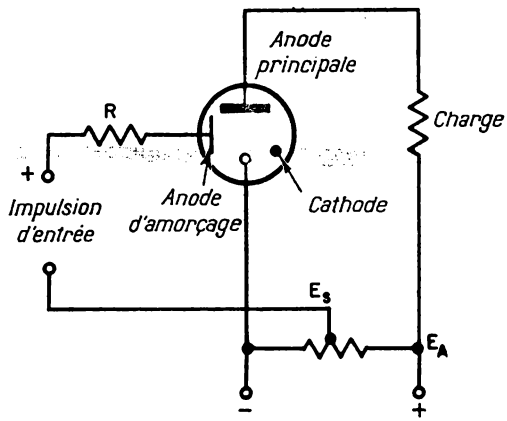

FIG. 38. — Montage d'une tube à cathode froide en relais.

du tube à cathode froide comme d'un relais. La tension E_a est supérieure à celle provoquant une décharge auto-entretenue dans le tube, mais inférieure à la tension provoquant une décharge disruptive ; on applique la tension E_s à l'électrode d'amorçage à travers l'organe de couplage d'entrée, et elle est un peu inférieure à la tension nécessaire pour déclencher le fonctionnement. Toute impulsion positive appliquée à la borne d'entrée supérieure s'ajoute à E_s, amenant ainsi la tension à une valeur supérieure à celle provoquant la décharge disruptive pour le circuit d'amorçage. La décharge électrode d'amorçage-cathode déclenche alors la décharge principale, et un courant passe alors dans la charge. On notera qu'il s'agit d'un mode de fonctionnement avec verrouillage automatique qu'on ne peut interrompre qu'en abaissant la tension anodique de manière qu'elle tombe

au-dessous de la tension nécessaire pour entretenir la décharge. Signalons à ce propos qu'on peut classer les petits tubes à cathode froide (à décharge de grille) dans la même catégorie d'ensemble que les thyratrons de petite puissance tels les tubes 884 ou 2050 si l'on se base sur l'intensité du courant maximum commandé. Ces tubes peuvent laisser passer environ 100 mA en service continu et on peut s'en servir pour des redresseurs de petite puissance, des régulateurs de tension, des oscillateurs à relaxation, des dispositifs à commutation et comme relais.

36. Le redresseur à bain de mercure

Bien que les thyratrons les plus puissants soient capables de fournir des puissances redressées atteignant 200 kW, ce sont essentiellement des organes du type « haute tension/courant peu intense » parce que l'intensité moyenne du courant qui les traverse ne dépasse pas 12 ampères et les grandes puissances mentionnées ne peuvent être obtenues que pour des tensions de l'ordre de 15 000 volts.

Du point de vue industriel — en particulier pour les applications exigeant des tensions peu élevées (200 à 550 volts) — le *redresseur à cathode à bain de mercure* convient beaucoup mieux. Les premiers redresseurs à bain de mercure construits comportaient une ampoule de verre (voir fig. 39). Une cuve ou un bain de mercure froids n'émettent pas d'électrons, mais on peut obtenir une source abondante d'électrons à partir de ce mercure froid si l'on peut interrompre brusquement un courant de mercure liquide parcouru par un courant électrique de manière à provoquer le jaillissement d'un arc. On fait fonctionner le tube de la figure 39 de cette manière. Pour amorcer l'arc, on fait basculer le tube vers la droite de manière qu'un courant de mercure s'écoule du bain principal vers la cavité située sur la branche latérale. Un courant électrique circule alors dans ce mercure du fait de la différence de potentiel appliquée entre l'électrode d'amorçage et le bain. Quand on replace le tube dans la position verticale, le courant de mercure est interrompu, et un arc s'amorce entre l'électrode auxiliaire et la surface du bain. Cela entraîne la formation d'une *tache cathodique* à la surface du bain, tache de laquelle s'échappent des électrons en quantité considérable. Placé comme

il l'est dans le champ électrique intense de l'anode, le bain fournit des électrons à l'anode pour l'amorçage d'un arc auto-entretenu.

Les électrons qui entrent dans l'arc proviennent de la tache cathodique qui se déplace librement sur toute la surface du bain du fait des forces exercées sur elle par les ions en retour et le liquide qui se vaporise autour d'elle. Les ions de mercure qui se forment à l'intérieur du tube reviennent sous l'action des

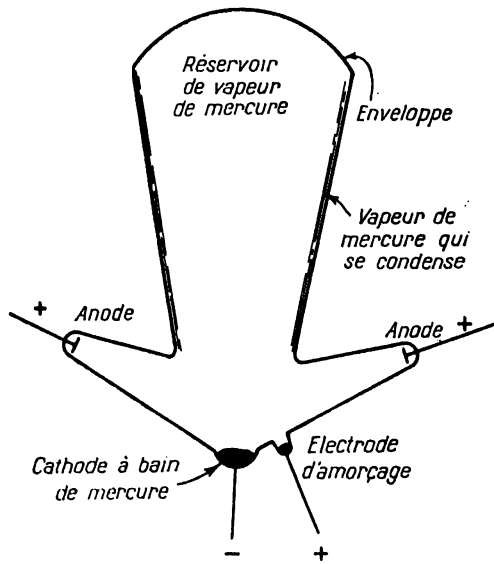

FIG. 39. — Une des premières réalisations de redresseur à bain de mercure.

forces électrostatiques dans le bain où ils captent les électrons nécessaires pour la reconstitution d'atomes de mercure liquide, ou bien sont neutralisés sur les parois de verre, où le mercure se condense du fait du refroidissement. Le mercure condensé s'écoule le long des parois et retombe de cette manière dans le bain. La matière de la cathode est ainsi constamment régénérée. Une électrode de ce genre est pratiquement indestructible.

Les redresseurs modernes polyphasés à vapeur de mercure à cuve sont construits sous la forme de cuves d'acier cylindriques de diamètre compris entre 1 et 2 pieds (305 à 610 mm) et de

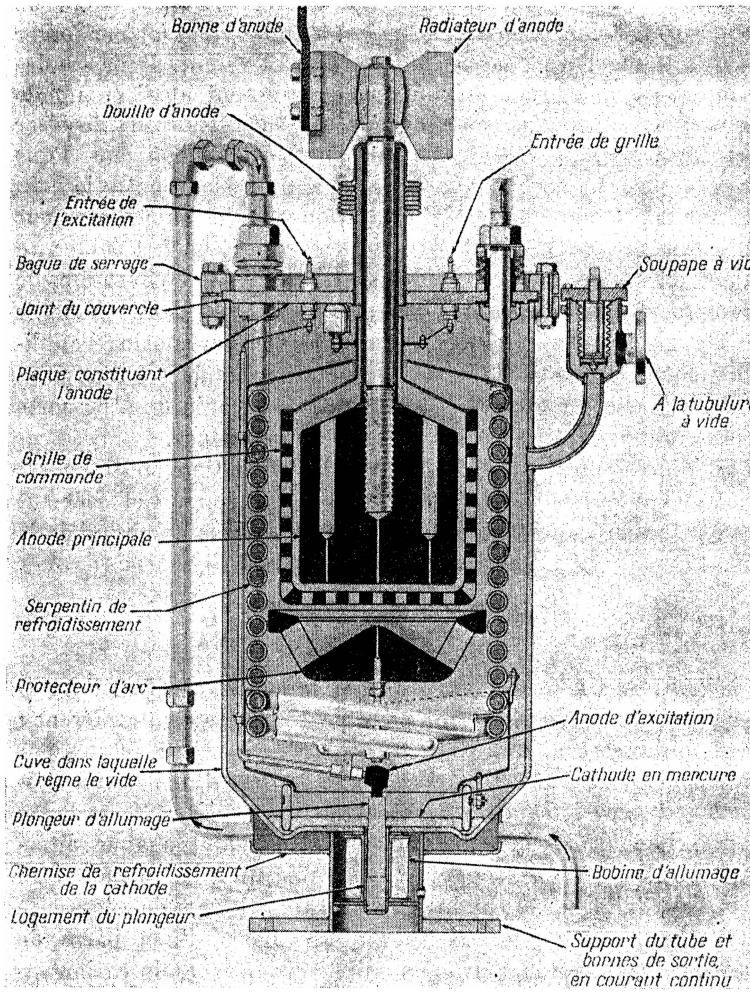

FIG. 40. — Coupe transversale dans le plan vertical d'un tube redresseur excitron (Allis-Chalmers/U.S.A.).

4 pieds (1 220 mm) de haut environ. Chaque cuve de redressement contient un bain et une anode uniques, avec leur dispositif d'amorçage. (Les cuves de redressement multianodiques sont pratiquement périmées et on ne les étudiera pas ici.) Un des

principaux inconvénients des anciens redresseurs à bain de mercure était constitué par la (ou les) manipulation (s) à effectuer pour rétablir l'arc chaque fois qu'il était éteint. Pour rendre l'emploi du redresseur à bain de mercure tout aussi commode que celui des tubes thermoioniques, il est nécessaire de disposer d'un flux continu d'électrons, que l'arc ait jailli ou non. Pour cela, on entretient en permanence un arc auxiliaire entre le bain et une électrode spéciale d'excitation placée immédiatement au-dessus de la cathode. Pour amorcer cet arc, on fait couler un mince jet de mercure entre le bain et l'électrode d'excitation, de manière à court-circuiter momentanément ces deux éléments et à provoquer l'amorçage d'un arc. La tension continue appliquée entre le dispositif d'amorçage et la cathode est d'environ 35 volts ; elle est fournie par une source séparée de telle sorte que l'arc d'excitation est entretenu en permanence.

Le redresseur à bain de mercure à excitation continue est souvent appelé, dans le commerce, « excitron ». Cet élément comporte aussi une grille qui agit sur le courant anodique de la même manière que l'élément équivalent dans le thyratron (fig. 40).

37. L'ignitron

L'ignitron diffère de l'excitron par le point suivant : l'amorçage de l'arc est basé sur un principe complètement différent : après qu'un arc a jailli dans un excitron, il est entretenu par l'électrode d'excitation connectée aux bornes d'une source distincte de courant continu. Dans l'ignitron, par contre, on laisse l'arc principal s'éteindre complètement pendant chaque alternance où le tube ne conduit pas, tandis qu'il se réamorce au début de l'alternance conductrice suivante. L'énergie nécessaire à l'amorçage est fournie par l'intermédiaire d'une barre de matériau semi-conducteur réfractaire, ou igniteur, de carborundum par exemple, qui plonge dans le bain de mercure principal (voir fig. 41). Quand un courant de 5 à 20 ampères circule entre la tige servant d'igniteur et le mercure, des arcs minuscules jaillissent entre la surface du semi-conducteur et la surface du bain, provoquant l'amorçage de l'arc. Le transfert du courant de l'igniteur à l'arc est presque instantané ; un courant peut, par conséquent, passer dans le circuit de l'arc principal pendant

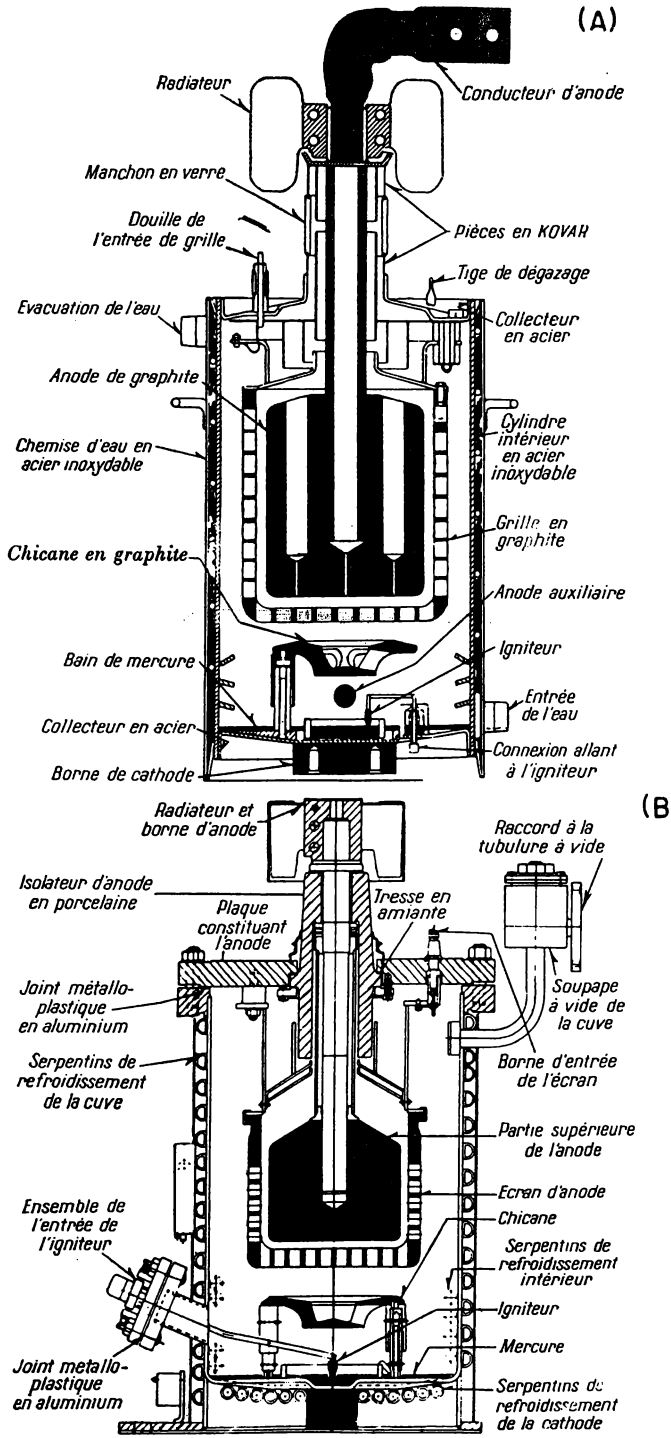

FIG. 41. — Vues en coupe de thyratrons choisis à titre d'exemple :

pratiquement toute l'alternance de conduction. L'igniteur lui-même reçoit des impulsions périodiques de courant exactement à l'instant voulu, de manière à abaisser à un chiffre relativement faible la consommation du circuit auxiliaire.

Une des caractéristiques les plus importantes de l'ignitron est la possibilité qu'il donne de permettre d'agir sur le courant débité par l'intermédiaire du circuit de l'igniteur. L'*angle d'amor-*

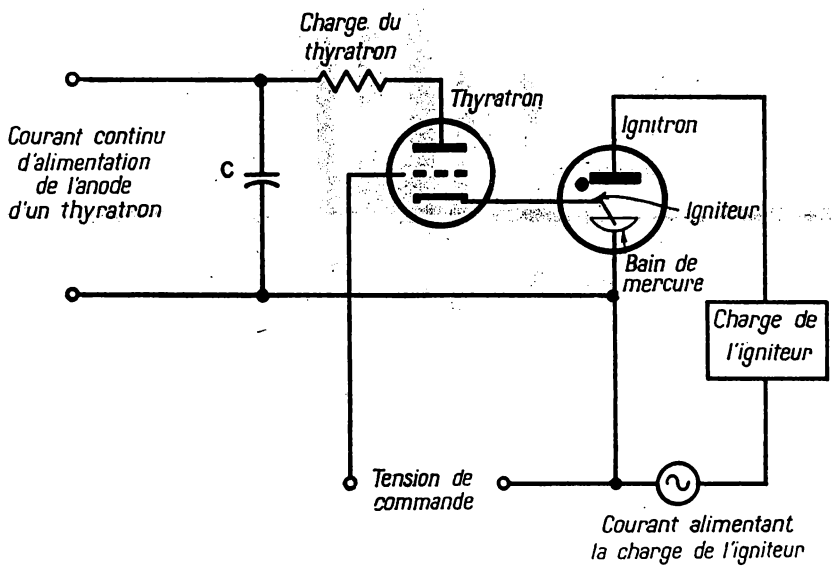

FIG. 42. — Mode d'utilisation d'un thyratron pour la commande de l'angle d'allumage d'un ignitron.

çage intervient à nouveau ici : l'intensité moyenne du courant de sortie de n'importe quel redresseur à courant commandé est fonction de la fraction de l'alternance pendant laquelle il laisse passer un courant.

Un des meilleurs moyens d'action sur l'angle d'amorçage d'un ignitron consiste à utiliser un thyratron pour commander le fonctionnement de l'igniteur. La figure 42 représente une des nombreuses méthodes permettant d'y parvenir. Un circuit déphaseur de commande, tel celui décrit précédemment détermine l'angle d'amorçage du thyratron de commande, quand ce tube s'amorce, son courant anodique passe par le circuit de l'igniteur, faisant ainsi jaillir l'arc principal de l'ignitron. La

tension anodique du thyratron est fournie par la charge du condensateur C, de telle sorte qu'aussitôt que C est déchargé par le thyratron à l'état conducteur, ce dernier se désamorce, tandis que le circuit grille devient à nouveau opérant. De cette manière, la fraction du cycle pendant laquelle le thyratron est conducteur est déterminée par l'angle d'amorçage du thyratron, que l'on peut faire varier à son tour en agissant sur la tension de commande appliquée à la grille. Ce genre de montage ne consomme qu'une très faible puissance d'amorçage et son fonctionnement est très sûr.

On emploie les ignitrons pour le redressement de très grandes puissances, car ils peuvent redresser des courants très intenses en régime continu. Une autre de leurs applications est la commande du passage du courant dans les opérations de soudage, etc.

Pour conclure, il y a une différence de principe très importante entre la commande par la grille dans un thyratron et la commande par la tige de l'igniteur dans un ignitron. La grille d'un thyratron *empêche* son amorçage, tandis que la tige de l'igniteur d'un ignitron *déclenche* le cycle de fonctionnement de ce dernier ; dans le premier cas, il y a toujours des électrons présents du fait de l'émission thermoionique, et l'action électrostatique de la grille empêche les électrons d'atteindre l'anode tant que l'amorçage ne s'est pas produit ; dans le second cas, le tube ne possède pas d'électrons libres susceptibles de provoquer une ionisation du gaz tant que la tache cathodique ne s'est pas formée.

Questions relatives au présent chapitre

1. Par quoi est commandée l'émission d'une cellule photo-électrique ?
2. Pourquoi n'y a-t-il pas de charge d'espace dans une cellule photo-électrique ?
3. Quelle est la tension anodique nominale maximum d'un tube 929 ?
4. Indiquer cinq emplois d'un tube à cathode froide.
5. Quel artifice emploie-t-on pour rendre le redresseur à bain de mercure équivalent à un tube thermoïonique ?
6. Exposer la différence fondamentale entre l'ignitron et l'excitron.
7. Comment règle-t-on l'instant du passage du courant dans un ignitron ?
8. Quelle est la différence fondamentale entre le mode d'action de la grille d'un thyratron et celui d'un igniteur dans un ignitron ?
9. Quelle est la durée de la cathode dans un tube à bain de mercure ?
10. Citer quelques emplois de l'ignitron.

INDEX ALPHABÉTIQUE

A

Amorçage d'un thyratron, 47.
Anode, 3.
Arc cathodique à faible point d'ébullition, 12.

B

Bloc d'alimentation à deux alternances à thyratron, 67.
— — fournissant trois tensions régulées (réalisation pratique), 39.

C

Caractéristiques d'une décharge gazeuse (récapitulation des), 13.
Cathode, 3.
— virtuelle, 22.
Cathodes à oxydes, 27.
Cellule photoélectrique à gaz, 7, 75.
Charge spatiale, 19, 20, 25.
Chute de tension des redresseurs à vide élevé, 23.
Circuit déphaseur, 62.
— régulateur de tension (réalisation pratique), 37, 39, 40, 42.
Circuits binaires (à compteur) à thyratrons, 72.
— temporisés (retardateurs) à thyratron, 71.
Coefficient de Townsend, 8.
Commande d'un thyratron par condensateur, 52.
— — — par déphasage, 59, 60.
— progressive par la grille d'un déclencheur à thyratron, 50.
Commande progressive (ou « quantitative ») par la grille d'un thyratron, 59.
Conductivité des gaz ionisés, 5.
Courant de préconduction d'un thyratron, 63.
— de saturation, 6, 7.
— de transfert d'un tube à cathode froide, 79.
Courbe caractéristique d'une cellule photoélectrique à gaz, 77.

D

Décharge disruptive, 9.
— en arc, 11.
— luminescente anormale, 11.
— luminescente auto-entretenue, 9
— non auto-entretenue, 7.
Diode à vide poussé, 18.

E

Électron, 1.
— accéléré (vitesse acquise par un), 4.
Excitron (tube redresseur), 83.
Extinction d'un thyratron, 47.

F

Filtres de lissage pour redresseurs à vapeur de mercure, 30, 31.
Fonctionnement d'un thyratron en déclencheur, 51.

G

Gaine, 14, 15.
Gaz ionisés, 5.
— utilisés dans les thyratrons, 53.
Gradient de potentiel, 2.

I

Igniteur, 84.
Ignitron, 84.
— commandé par un thyratron, 86.
Intensité maximum de crête d'un redresseur à vapeur de mercure, 28.
— nominale d'un redresseur à vapeur de mercure, 28.
Ion accéléré (vitesse acquise par un), 4.
— négatif, 2.
— positif, 1.
Ionisation simple, 25.
— dans les gaz, 1.

L

Libre parcours moyen, 25.

P

Plasma, 14, 15, 27.
— électrique, 26.
Pulvérisation cathodique, 27.

R

Redressement par une diode à vide poussé, 16, 18.
Redresseur à bain de mercure, 81.
— parfait, 24.
— réel, 24.
Redresseurs à vapeur de mercure (caractéristiques des), 28, 29.
Régulateur de tension à un seul tube à gaz (schéma de principe), 35.
Régulation de tension, 26.
— électronique de la tension, 40.
Résistance de grille du thyratron, 63.

S

Saturation par la charge spatiale, 23.
— par la température, 23.
Surintensité maximum d'un redresseur à vapeur de mercure, 28.

T

Tension d'amorçage d'un tube à gaz, 33, 34, 57.
— de désamorçage d'un thyratron, 57.
— de désintégration, 27.
— inverse maximum de crête d'un redresseur à vapeur de mercure, 28.
— nominale d'un redresseur à vapeur de mercure, 28.
Thyratron à grille-écran, 65.
— triode (structure d'un), 45.
— dans un circuit à courant alternatif, 54, 55.
— dans un circuit à courant continu (principe du fonctionnement d'un), 46.
— monté en interrupteur non verrouillé, 66.
Thyratrons (les), 45, 85.
— dans les circuits à courants forts (les), 69.
— montés « tête-bêche » pour alimenter une charge, 68.
Tube à gaz à cathode froide (à décharge de grille), 78.
— redresseur à bain de mercure, 81.
Tubes à gaz régulateurs de tension, 33, 36.
— — — — — (principe des) 33.
— redresseurs à gaz, 24.
— — — à vide poussé, 17, 18.

IMPRIMERIE NOUVELLE, ORLÉANS (O.P.I.A.C.L. 31.0427). — 4625-9/1962.

Dépôt légal : N° 4122 (4e trimestre 1962).

Imprimé en France.